

中国电力百科全书

水力发电卷



中国电力出版社

目 录

前言

凡例

水力发电卷序言

条目分类目录

彩图插页目录

正文 1~603

条目汉字笔画索引 604

条目外文索引 (INDEX OF ARTICLES) 611

内容索引 621

条 目 分 类 目 录

说 明

一、本目录供分类查检条目之用。

二、有的条目有多种属性，可能在几个分支学科和分类中出现。例如“土的工程分类”条既列入力学基础分支，又列入勘测设计和科研试验技术分支。

三、参见条（虚条）的页码采取虚实条兼注的方式，即参见条页码在括号外，被参见条页码在括号内。

四、凡加有 [] 者，不是条目标题，而是分类集合的提示词。例如 [概论]、[中国水能资源]。

[概论]

水力发电	372
小水电	515
水能资源	433
水系	447

[中国水能资源]

长江水系水能资源	36
黄河水系水能资源	159
珠江水系水能资源	590
海河水系水能资源	137
淮河水系水能资源	152
黑龙江水系中国部分水能资源 ...	142
鸭绿江水系中国部分水能资源 ...	532
辽河水系水能资源	227
闽江水系水能资源	240
钱塘江水系水能资源	259
怒江水系水能资源	250
澜沧江水系水能资源	219
雅鲁藏布江水系水能资源	533
伊犁河水系水能资源	554

[世界水能资源]

苏联水能资源	452
美国水能资源	239
加拿大水能资源	178
拉丁美洲水能资源	218
欧洲水能资源	251
非洲水能资源	102

亚洲水能资源	535
水资源综合利用	450
河流规划	139
长江宜宾—宜昌段水电规划	37
金沙江水电规划	186
雅砻江水电规划	533
大渡河水电规划	58
乌江水电规划	507
湘西沅澧水电规划	510
黄河上游水电规划	158
黄河中游水电规划	160
红水河水电规划	144
澜沧江中下游水电规划	220
松花江水电规划	452
鸭绿江水电规划	531
跨流域引水发电规划	215
地区电源及水电发展规划	70
水电站工程规划	320
水库	360
水电站	311

[常规水电站]

坝式水电站	16
引水式水电站	561
混合式水电站(见引水式 水电站)	161(561)
径流式水电站	191
梯级水电站	458
抽水蓄能电站	46

潮汐电站	42	冰凌	28
[气象、水文、泥沙]		冰塞	29
气象要素	257	冰坝	27
降水	180	水土流失	437
蒸发	575	河流泥沙	140
风	106	河流泥沙物理性质	142
气温	257	[泥沙运动基本规律]	
湿度	291	推移质泥沙	494
气压	258	泥沙起动流速	247
水文学	444	沙波运动	273
暴雨	22	悬移质泥沙	529
径流	190	泥沙沉降速度	246
洪水	144	水流挟沙能力	378
水文勘测	443	异重流	557
水文站网	446	高含沙水流	112
水位观测	438	[水电站泥沙]	
流量测验	229	年输沙量	248
泥沙测验	246	水库淤积	371
冰情观测	28	水库变动回水区	362
水库水文泥沙观测	367	坝区泥沙淤积	14
水文调查	442	引水防沙	559
暴雨调查	22	水库下游河道冲刷	368
洪水调查	146	沉沙池	44
水文计算	442	[力学基础]	
水文资料	447	理论力学	224
水文频率分析	443	固体力学	131
离差系数	222	材料力学	32
偏差系数	253	弹性力学	457
设计年径流	276	塑性力学	453
设计洪水	275	流变学	228
设计洪水过程线	275	断裂力学	94
施工设计洪水	288	结构力学	184
入库洪水	265	结构优化	185
可能最大暴雨	205	结构可靠度	184
可能最大洪水	206	散体力学	272
水位流量关系	438	爆炸力学	23
随机水文过程	454	计算力学	176
水文预报	445	实验应力分析	296
洪水预报	149	流体力学	230
水文自动测报系统	447	水力学	376

水静力学	358	土的压实	475
水动力学	348	有效应力原理	564
势流	301	土的力学性质	474
涡流	504	土体稳定性	492
层流	33	土的固结与沉降	473
紊流	503	土压力	494
边界层	26	土动力学	477
波浪	29	土体液化	493
水流阻力	378	土工模型试验	478
管道水力学	131	土体应力应变分析	493
孔口出流	210	土体加固	491
水击	357	土工合成材料	478
明渠水力学	242	区域性土	263
缓流	158	土工原型观测	480
急流	176	土的原位测试	476
堰流	551	土工取样	479
水跃	449	渗流	278
水射流	436	渗透变形	280
高速水流	112	反滤层	100
空化	208	渗流控制	278
空蚀	209		
掺气水流	35		
[河道水力学计算]		[勘测设计和科研试验技术]	
水库回水	365	工程地质学	122
明渠不恒定流	241	地貌	68
洪水演进	148	喀斯特	200
溃坝洪水	216	岩溶(见喀斯特)	537(200)
岩石力学	542	地质年代	80
岩石力学性质	543	滑坡	151
地应力(见地应力测试)	77(77)	崩塌	24
岩体稳定性	548	岩土体蠕变	550
岩石工程数值分析	541	泥石流	248
岩体原位观测	549	古河道	128
地下工程围岩	73	冰川	27
岩石边坡	540	岩石	538
岩石地基	541	地质构造	79
岩爆	535	褶皱	573
岩基处理	536	断层	94
灌浆	133	节理	183
土力学	480	裂隙(见节理)	227(183)
土的工程分类	473	产状	35
		岩体结构	546

岩体风化	546
岩体软弱结构面	548
土的工程分类	473
岩爆	535
土体液化	493
水文地质	440
地下水	76
单位吸水量	64
承压水	45
水质	449
涌水	564
工程地质评价	119
地震	78
地震烈度	78
地震危险性分析	79
水库诱发地震	371
工程地质勘察	118
工程地质测绘	117
水文地质测绘	439
地球物理勘探	69
遥感	552
工程地质试验	121
水文地质试验	439
灌浆试验(见灌浆)	134(133)
工程地质钻探	124
天然建筑材料勘察	462
坝址工程地质勘察	18
水库工程地质勘察	365
工程地质监测	117
工程地质图	122
软基勘察	266
工程测量	115
高程	111
平面控制测量	254
高程控制测量	111
地形测量	77
摄影测量	276
航空摄影测量	137
断面测量	95
河道测量	139
施工测量	282

工程测量仪器	116
水工模型试验	356
水力要素量测	377
水力相似原理	375
、渗流水电比拟法	279
泥沙模型试验	247
空化试验	208
水击模型试验	358
水工结构模型试验	353
水工结构模型试验量测技术	354
水工结构模型试验相似理论	354
水工结构静力模型试验	352
脆性材料水工结构模型试验	53
全息散斑水工结构模型试验	264
光弹性试验	134
水工结构破坏模型试验	355
水工结构抗震试验	353
[岩土试验]	
岩体力学性质现场试验	547
地应力测试	77
岩体位移监测(见岩体原位 观测)	548(549)
岩体力学性质试验(见岩石 力学性质)	547(543)
岩体模型试验	547
土工试验(见土力学)	480(480)
土石料现场碾压试验(见土 石坝材料现场试验)	491(484)
土工取样	479
土的原位测试	476
土工模型试验	478
水工建筑物原型观测	351
混凝土坝原型观测	164
土石坝原型观测	487
地下建筑物原型观测	74
泄水建筑物原型观测	523
水电站计算机辅助设计	326
勘测设计技术标准	204

[水能利用]

水能利用学	429
-------------	-----

径流调节	192
时历法径流调节	293
数理统计法径流调节	303
径流系列人工生成	195
径流随机模型	191
水库群补偿径流调节	366
水库调度图	363
综合利用水库径流调节	600
洪水调节	146
动库容	91
静库容(见动库容)	196(91)
防洪调度(见洪水调节)	100(146)
水库初期蓄水	363
[水电站容量和发电量]	
装机容量	599
工作容量	124
备用容量	23
检修容量(见电力电量平衡) ...	179(80)
受阻容量(见水电站设计	
水头)	302(337)
年发电量	248
[水电站动能经济]	
水头	437
水电站设计水头	337
水电站出力	318
保证出力	21
预想出力(见水电站设计	
水头)	566(337)
水电站运行方式	344
电力电量平衡	80
水能经济	428
水电站经济评价	335
水电站投资	341
水电站生产成本	337
水电站年运行费(见水电站	
生产成本)	336(337)
水电站效益	342
综合利用工程费用分摊	599
水电站经济分析	334
水电站财务分析	313
水能利用优化	430

[特征水位]	
正常蓄水位	575
校核洪水位	181
设计洪水位(见校核洪	
、水位)	276(181)
防洪高水位	100
汛期限制水位	529
死水位	451
尾水位	502

[环境保护及水库淹没]

环境影响	153
环境影响评价	155
环境影响评价方法	156
环境保护设计	152
环境监测	153
水库淹没处理	368
水库淹没实物指标	370
移民安置	555
专项迁建	596
库区综合开发	215
库底清理	214
脱水段	495

[水工建筑物]

[水电站工程]	
水电枢纽	309
水工建筑物	350
坝	6
坝址	17
坝线	16
坝型选择	16
重力坝	588
空腹坝	207
拱坝	126
支墩坝	576
连拱坝	226
碾压混凝土坝	249
土石坝	482
混凝土面板堆石坝	169
砌石坝	259

坝基	10	压力前池	530
坝基稳定	12	调压室	467
拱座稳定	127	水电站厂房	314
岩石坝基处理(见岩石		坝后式厂房	10
处理)	540(536)	岸边式厂房	3
帷幕	501	地下式厂房	74
软基处理	265	坝内式厂房	13
泄水建筑物	519	溢流式厂房	559
岸边溢洪道	4	河床式厂房	138
溢流坝	558	主厂房	592
泄洪隧洞	518	发电机层	99
泄水闸	523	水轮机层	414
坝身泄水孔	15	机墩	175
消力池	512	副厂房	107
消力库	513	水轮机安装高程	413
挑流鼻坎	469	过坝设施	136
引水系统	562	船闸	52
水电站进水口	333	升船机	280
拦污栅	219	筏道	99
清污机	261	鱼道	565
深孔式进水口	278	[闸门及启闭设施]	
岸塔式进水口	5	闸门	572
竖井式进水口	302	弧形闸门	149
岸坡式进水口	5	平面闸门	254
塔式进水口	457	叠梁	88
坝式进水口	15	工作闸门	125
开敞式进水口	202	事故闸门	302
进水闸	189	检修闸门	179
冲沙闸	46	泄洪闸门	519
沉沙池	44	启闭机	256
引水隧洞	561		
引水明管	560	[水电站工程施工]	
镇墩	575	施工导流	283
伸缩节	277	[导流方式]	
压力管道	530	渐流围堰导流	94
坝内管	13	分期围堰导流	103
坝后背管	9	施工期渡汛	287
岔管	34	[导流建筑物]	
尾水隧洞	502	围堰	500
尾水渠	502	导流泄水建筑物	65
引水明渠	561	导流隧洞(见导流泄水建	

筑物) 65(65)	梯段爆破 458
导流明渠(见导流泄水建	光面爆破 134
筑物) 65(65)	预裂爆破 566
截流 185	定向爆破 89
[混凝土工程]	水下爆破 448
混凝土 161	岩塞爆破 537
水工混凝土 349	土石坝施工 485
水泥 436	土石料开采 489
混凝土骨料 167	土石料填筑 490
天然骨料 462	土石坝材料现场试验 484
人工骨料 265	[地下工程]
掺和料 34	隧洞开挖 454
粉煤灰 104	掘进机开挖 198
外加剂 497	新奥地利隧洞施工法 525
混凝土工程施工 165	竖井开挖 302
混凝土制备 172	斜井开挖 517
混凝土配料 170	地下厂房开挖 71
混凝土拌和 165	地下工程施工支护 72
模板 244	地下工程施工安全与防护 72
混凝土质量控制 173	锚喷 237
混凝土养护 172	灌浆 133
混凝土温度控制 170	固结灌浆 130
混凝土坝施工 162	帷幕灌浆 501
[特殊混凝土施工]	接触灌浆 182
预填骨料压浆混凝土施工 566	回填灌浆 160
碾压混凝土施工 249	砂砾石地基灌浆 274
预应力混凝土施工 567	接缝灌浆 182
水下混凝土施工 449	化学灌浆 152
沥青混凝土施工 226	[施工机械]
[土石方开挖]	土石方开挖机械 487
土方开挖 477	钻孔机械 601
石方开挖 292	灌浆机械 134
钻孔爆破 601	混凝土浇筑机械 168
[爆破器材]	土石方压实机械 489
导火索 64	运输机械 570
导爆索 64	施工工厂设施 286
导爆管 64	施工总布置 288
雷管 222	施工交通运输 287
炸药 573	施工对外交通 285
[特殊爆破]	施工场内交通 282
洞室爆破 92	施工供电 287

施工总进度	289	球阀	262
控制性进度	214	圆筒阀	567
[水电站机电部分]		调压阀	466
水轮机	409	水轮机调速器	422
[水轮机型式]		测速装置	32
混流式水轮机	161	调速器调节规律	466
轴流式水轮机	589	双重调节	305
斜流式水轮机	518	防飞逸措施	100
贯流式水轮机	132	防抬机措施	101
冲击式水轮机	45	油压装置	564
水泵水轮机	308	调节保证	465
水轮机相似理论	424	压力上升率	531
水轮机模型试验	418	转速上升率	598
水轮机单位参数	414	[水轮发电机组附属设备]	
比转速	24	主厂房起吊设备	595
水轮机综合特性图	427	水电站排水系统	336
[水轮机基本参数]		水电站供水系统	323
水轮机特征水头	422	水电站油系统	343
水轮机效率	425	水电站压缩空气系统	342
水轮机流量	418	水力监测	375
水轮机额定转速	416	水轮发电机	380
水轮机飞逸转速	416	[水轮发电机型式]	
转轮公称直径	598	立式水轮发电机	224
水轮机出力	414	悬式水轮发电机(见立式	
水轮机汽蚀和磨损	420	水轮发电机)	529(224)
汽蚀系数	258	伞式水轮发电机(见立式	
水轮机吸出高度	423	水轮发电机)	272(224)
水轮机排出高度	419	卧式水轮发电机	505
[水轮机部件]		灯泡式水轮发电机	67
转轮	597	抽水蓄能发电电动机	48
水轮机主轴	427	水轮发电机基本电气参数	385
水轮机导轴承	415	水轮发电机转动惯量	395
蜗壳	504	水轮发电机转速	395
座环	602	[水轮发电机部件]	
顶盖	89	水轮发电机定子	384
底环	68	水轮发电机转子	396
导水机构	66	水轮发电机推力轴承	394
尾水管	501	水轮发电机导轴承	383
进口阀	189	水轮发电机机架	385
蝴蝶阀	150	水轮发电机基础	387
		水轮发电机绝缘等级	390

[水轮发电机冷却方式]		同步系统	469
水轮发电机空气冷却	391	控制电缆	210
水轮发电机水内冷	393	[测量]	
水轮发电机氟里昂内冷	385	电气量测量	83
水轮发电机组停机制动	403	非电气量测量	101
水轮发电机励磁	391	水电站自动化	347
抽水蓄能机组起动方式	51	水轮发电机组自动控制	408
[电气一次回路]		水电站公用设备自动控制	322
电气主接线	87	水电站自动发电控制	346
接入系统设计	182	水电站自动电压控制	346
发电机电压侧接线	99	水电站计算机监控系统	327
发电机-变压器组接线	98	远动	568
[升高电压侧接线]		梯级水电站集中控制	461
变压器-线路组接线	26	中央控制室	587
桥形接线	259	水电站通信	339
角形接线	181	[机电设备布置]	
单母线接线	63	主厂房机电设备布置	594
双母线接线	306	主变压器布置	591
一个半断路器接线	553	开关站	203
三分之四断路器接线	268	副厂房布置(见副厂房)	108(107)
均衡母线接线	198	[采暖通风]	
[厂用电]		厂房通风	38
厂用电电源	39	厂房采暖	38
厂用电负荷	40	[机电设备安装]	
厂用电接线	41	水轮机安装	411
短路电流	93	水轮发电机安装	382
电气设备	84	金属结构安装	187
气体绝缘金属封闭电器	256	电气一次设备安装	85
水电站过电压保护	323	电气二次设备安装	82
水电站接地系统	331	水轮发电机组起动试运行	401
水电站照明	346	引水系统充水	563
水电站照度	345	水轮发电机组空载试验	400
[电气二次回路]		水轮发电机组带负荷试验	398
控制电源	211	[水电站运行管理]	
继电保护	177	水电站厂内经济运行	316
水轮发电机继电保护	388	水轮发电机组动力特性	399
抽水蓄能发电电动机继电保护	50	水轮发电机组效率试验	404
厂用电备用电源自动投入	39	水轮机运转特性曲线	426
远方跳闸装置	569	水电站水库优化调度	338
控制系统	213	[水电站机组运行方式]	
信号系统	527		

水轮发电机组调峰	402	云峰水电站	569
水轮发电机组调相	402	大化水电站	60
水轮发电机组调频	402	凤滩水电站	106
水轮发电机组进相运行	400	三门峡水利枢纽	269
水轮发电机组不对称运行	398	渭源水电站	503
水电站机电设备运行管理	326	新丰江水电站	526
水轮机水压脉动	421	碧口水电站	25
水轮发电机组振动	407	沙溪口水电站	273
水轮发电机轴电流	395	紫水滩水电站	188
绝缘油色谱分析	197	富春江水电站	108
局部放电分析	196	青铜峡水利枢纽	260
水轮发电机电晕	384	[中小河流梯级水电站]	
水轮机静平衡	417	大甲溪梯级水电站	60
水轮发电机转子动平衡	397	以礼河梯级水电站	556
水轮发电机组轴线调整	408	古田溪梯级水电站	129
[水工建筑物维修]		猫跳河梯级水电站	236
大坝维修	56	龙溪河梯级水电站	230
泄水建筑物维修	522	西洱河梯级水电站	510
水二金属结构维修	355	[在建水电站]	
大坝安全管理与监测	55	三峡水利枢纽	270
水电站防火	318	二滩水电站	96
		李家峡水电站	223
[国内外水电站实例]		小浪底水利枢纽	513
中国大中型水电站	577	漫湾水电站	235
[已建水电站]		永口水电站	359
葛洲坝水利枢纽	113	天生桥二级水电站	463
白山水电站	19	岩滩水电站	545
龙羊峡水电站	231	五道溪水电站	508
刘家峡水电站	227	澜河岩水电站	114
丹江口水利枢纽	62	天生桥一级水电站	464
安康水电站	2	万家寨水利枢纽	498
丰满水电站	104	宝珠寺水电站	20
龚嘴水电站	125	铜街子水电站	471
新安江水电站	524	东风水电站	89
乌江渡水电站	506	中国早期水电站	586
水丰水电站	349	世界大水电站	296
鲁布革水电站	233	伊泰普水电站	554
东江水电站	90	古里水电站	128
万安水电站	498	大古力水电站	59
柘溪水电站	574	图库鲁伊水电站	472
盐锅峡水电站	550	拉格朗德二级水电站	218

萨扬-舒申斯克水电站	268	密云抽水蓄能电站	239
克拉斯诺雅尔斯克水电站	206	岗南抽水蓄能电站	110
丘吉尔瀑布水电站	261	[在建抽水蓄能电站]	
布拉茨克水电站	30	广州抽水蓄能电站	135
乌斯特-伊里姆水电站	507	天荒坪抽水蓄能电站	461
卡博拉巴萨水电站	201	明潭拍水蓄能电站	243
雅西雷塔水电站	534	十三陵抽水蓄能电站	291
鲍古昌水电站	21	羊卓雍湖抽水蓄能电站	551
[潮汐电站]		[世界抽水蓄能电站]	
江夏潮汐电站	179	巴斯康蒂抽水蓄能电站	6
朗斯潮汐电站	220	勒丁顿抽水蓄能电站	221
安娜波利斯潮汐试验电站	3	狄诺维克抽水蓄能电站	68
基斯洛潮汐试验电站	175	大屋抽水蓄能电站	61
[中国抽水蓄能电站]		阿尔托格索抽水蓄能电站	1
[已建抽水蓄能电站]		新高濑川抽水蓄能电站	527
明湖抽水蓄能电站	240	扎戈尔斯克抽水蓄能电站	572
潘家口抽水蓄能电站	252		

彩图插页目录

1. 中国可开发水能资源按地区分布示意图	1	34. 三峡水轮机模型试验	20
2. 中国河川水能资源分布图	1	35. 三峡泥沙模型试验	20
3. 世界河川水能资源分布图	1	36. 三峡水工模型试验	20
4. 中国大中型水电站分布图	2	37. 龙羊峡水电站厂房三维光弹性试验模型	21
5. 中国水系图	4	38. 龙羊峡水电站厂房三维光弹性自重试验切片等色线条纹图	21
6. 中国年降水量图	5	39. 大型高压水工三轴剪力试验机	21
7. 中国年径流深图	6	40. 水工模型试验减压箱设备	22
8. 龙羊峡水电站	7	41. 大型土工离心模型试验机	22
9. 葛洲坝水利枢纽	7	42. 二滩水电站双曲拱坝振动台抗震试验	22
10. 乌江渡水电站	8	43. 三峡坝址地区航空彩红外照片	23
11. 白山水电站	8	44. 隔河岩水电站升船机塔柱振动台抗震试验	24
12. 东江水电站	9	45. 葛洲坝水利枢纽大江电厂20号水轮机转轮叶片背面损坏	24
13. 施工中的漫湾水电站	9	46. 定桨式水轮机转轮汽蚀	24
14. 施工中的水口水电站	10	47. 丹江口水利枢纽坝后式电站主厂房	25
15. 丹江口水利枢纽	10	48. 凤滩水电站空腹拱坝坝内主厂房	25
16. 新安江水电站	11	49. 巴斯康蒂抽水蓄能电站地下主厂房	26
17. 石泉水电站	11	50. 龙羊峡水电站主厂房	26
18. 石龙坝水电站	12	51. 葛洲坝水利枢纽二江电厂中央控制室	27
19. 丰满水电站	12	52. 葛洲坝水利枢纽500/220 kV联络变压器	27
20. 建在溶洞中的瓜仲河水电站	13	53. 葛洲坝水利枢纽大江电厂500 kV开关站	28
21. 刘家峡水电站	13	54. 广州抽水蓄能电站500 kV出线	28
22. 朗斯潮汐电站	14	55. 广州抽水蓄能电站500 kV气体绝缘金属封闭电器	29
23. 古里水电站	14		
24. 大古力水电站	15		
25. 伊泰普水电站	15		
26. 克拉斯诺雅尔斯克水电站	16		
27. 大屋抽水蓄能电站	16		
28. 暗河	17		
29. 溶洞（中国贵州）	17		
30. 黄河八里胡同大断层	18		
31. 三峡库区新滩滑坡	18		
32. 水文测验	19		
33. 三峡坝址钻探	19		

56. 安康水电站 330 kV 气体绝缘金属封闭电器	29	77. 大狄克逊坝	39
57. 小江水电站（以礼河四级）横轴冲击式水轮发电机组	30	78. 努列克坝	39
58. 葛洲坝水电站水轮机转轮吊装	30	79. 英古里水电站拱坝	40
59. 漫湾水电站水轮发电机转子吊装	30	80. 日本岛地川碾压混凝土重力坝	40
60. 水轮发电机组模型	31	81. 鲁布革水电站隧洞全断面衬砌施工	41
61. 水轮机转轮	31	82. 鲁布革水电站隧洞全断面衬砌完成段	41
62. 潘家口抽水蓄能机组定子叠装	31	83. 鲁布革水电站隧洞 7/10 断面浇筑	42
63. 漫湾水电站蜗壳安装	32	84. 五强溪水电站大坝通仓浇筑	42
64. 水口水电站钢管安装	32	85. 五强溪水电站大坝施工缆索起重机	43
65. 二滩水电站坝址	33	86. 五强溪水电站施工截流	43
66. 三峡水利枢纽坝址	33	87. 漫湾水电站大坝基坑开挖	44
67. 湖南双江口平板坝	34	88. 漫湾水电站施工	44
68. 安徽梅山连拱坝	34	89. 普定水电站碾压混凝土拱坝施工	45
69. 广州抽水蓄能电站上水库面板堆石坝	35	90. 普定水电站碾压混凝土与基岩的接合部取样	45
70. 广州抽水蓄能电站下水库碾压混凝土重力坝	35	91. 二滩水电站导流隧洞出口施工	46
71. 白山水电站地下式厂房	36	92. 柘溪水电站升船机	46
72. 碧口水电站岸边式厂房	36	93. 红枫水电站（猫跳河一级）水库	47
73. 八盘峡水电站河床式厂房	37	94. 葛洲坝水利枢纽大江 1 号船闸	47
74. 刘家峡水电站右岸岸边溢洪道泄洪	37	95. 紧水滩水电站右岸过坝设施	48
75. 东江水电站坝后式厂房	38	96. 刘家峡水电站水库库区炳灵寺文物保护	48
76. 大化水电站底流消能	38		

萨扬-舒申斯克水电站	268	密云抽水蓄能电站	239
克拉斯诺雅尔斯克水电站	206	岗南抽水蓄能电站	110
丘吉尔瀑布水电站	261	[在建抽水蓄能电站]	
布拉茨克水电站	30	广州抽水蓄能电站	135
乌斯特-伊里姆水电站	507	天荒坪抽水蓄能电站	461
卡博拉巴萨水电站	201	明潭抽水蓄能电站	243
雅西雷塔水电站	534	十三陵抽水蓄能电站	291
鲍古昌水电站	21	羊卓雍湖抽水蓄能电站	551
[潮汐电站]		[世界抽水蓄能电站]	
江厦潮汐电站	179	巴斯康蒂抽水蓄能电站	6
朗斯潮汐电站	220	勒丁顿抽水蓄能电站	221
安娜波利斯潮汐试验电站	3	狄诺维克抽水蓄能电站	68
基斯洛潮汐试验电站	175	大屋抽水蓄能电站	61
[中国抽水蓄能电站]		阿尔托格索抽水蓄能电站	1
[已建抽水蓄能电站]		新高濑川抽水蓄能电站	527
明湖抽水蓄能电站	240	扎戈尔斯克抽水蓄能电站	572
潘家口抽水蓄能电站	252		



A'ertuogesuo Choushui Xu'neng Dianzhan

阿尔托格索抽水蓄能电站 (Alto - Gesso Pumped Storage Power Station)

混流式抽水蓄能电站，位于意大利皮埃蒙省西南部阿尔卑斯山区，在都灵市以南 75 km 处，以 380 kV 超高压输电线路联入意大利国家电力系统，承担系统内调峰任务和备用容量。电站总装机容量 1317 MW，年发电量 12.6 亿 kW·h，其中天然径流发电 1.9 亿 kW·h，抽水蓄能发电 10.7 亿 kW·h。电站于 1976 年 6 月开工，1980 年第一台机组发电，1981 年底竣工。工程平面布置见图 1，纵剖面见图 2。

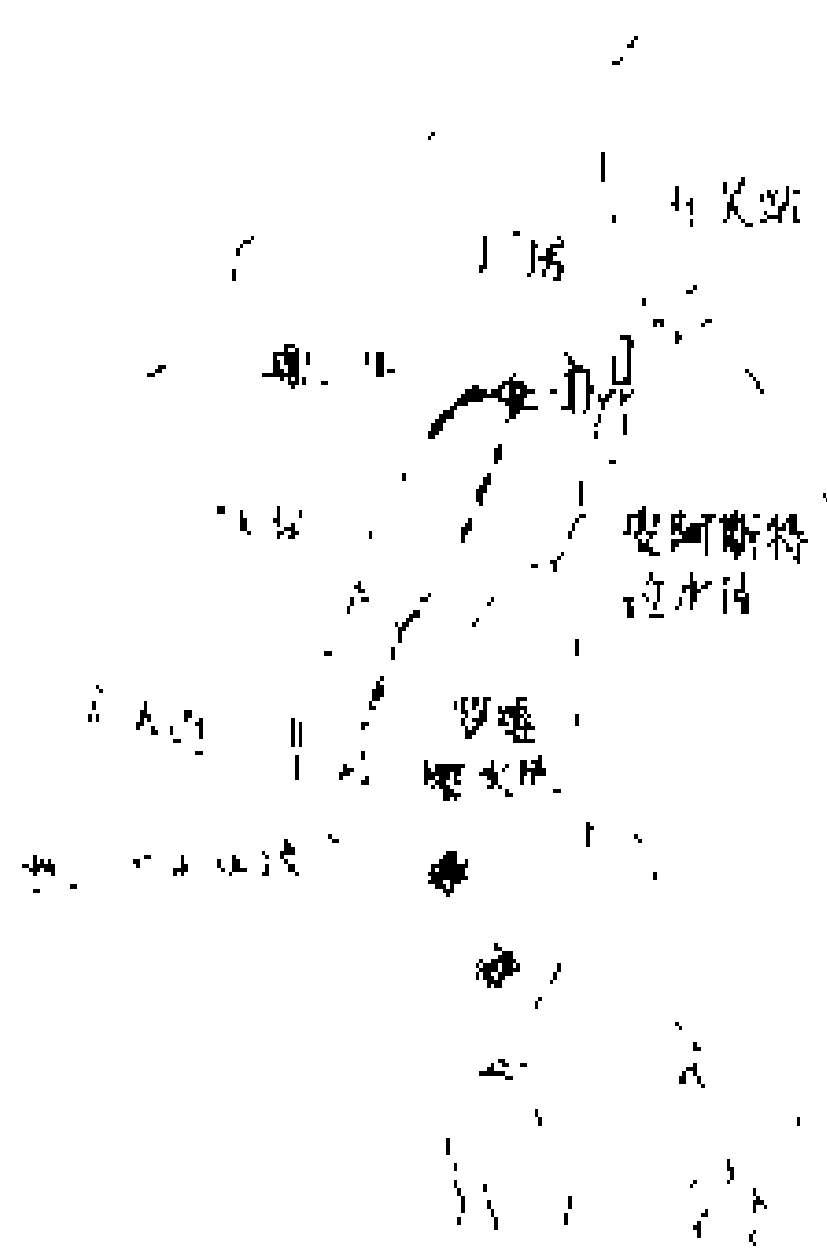


图 1 阿尔托格索抽水蓄能电站工程总布置示意图

上水库和下水库 电站设有 2 座上水库和 1 座下水库。

契奥塔斯 (Chiota) 上水库，坝址以上流域面积 11.6 km²，建有 2 座大坝。主坝为重力拱坝，最大坝高 130 m。副坝为重力坝，最大坝高 30 m。正常蓄水位 1978 m，低水位 1910 m，调节库容 2730 万 m³，可进行季调节。

罗维娜 (Rovina) 上水库系壅高天然湖泊水位而成，其天然流域面积为 4.2 km²，并通过 2 套集水系统自相邻小流域引水，使总集水面积增加至 77.2 km²。

正常蓄水位 1528 m，低水位 1517 m，调节库容 120 万 m³，仅能进行日调节。

下水库利用 1965 年建成蓄水的皮阿斯特拉 (Piasera) 水库。混凝土重力坝高 88 m，正常蓄水位 956 m，低水位 930 m，调节库容 900 万 m³。

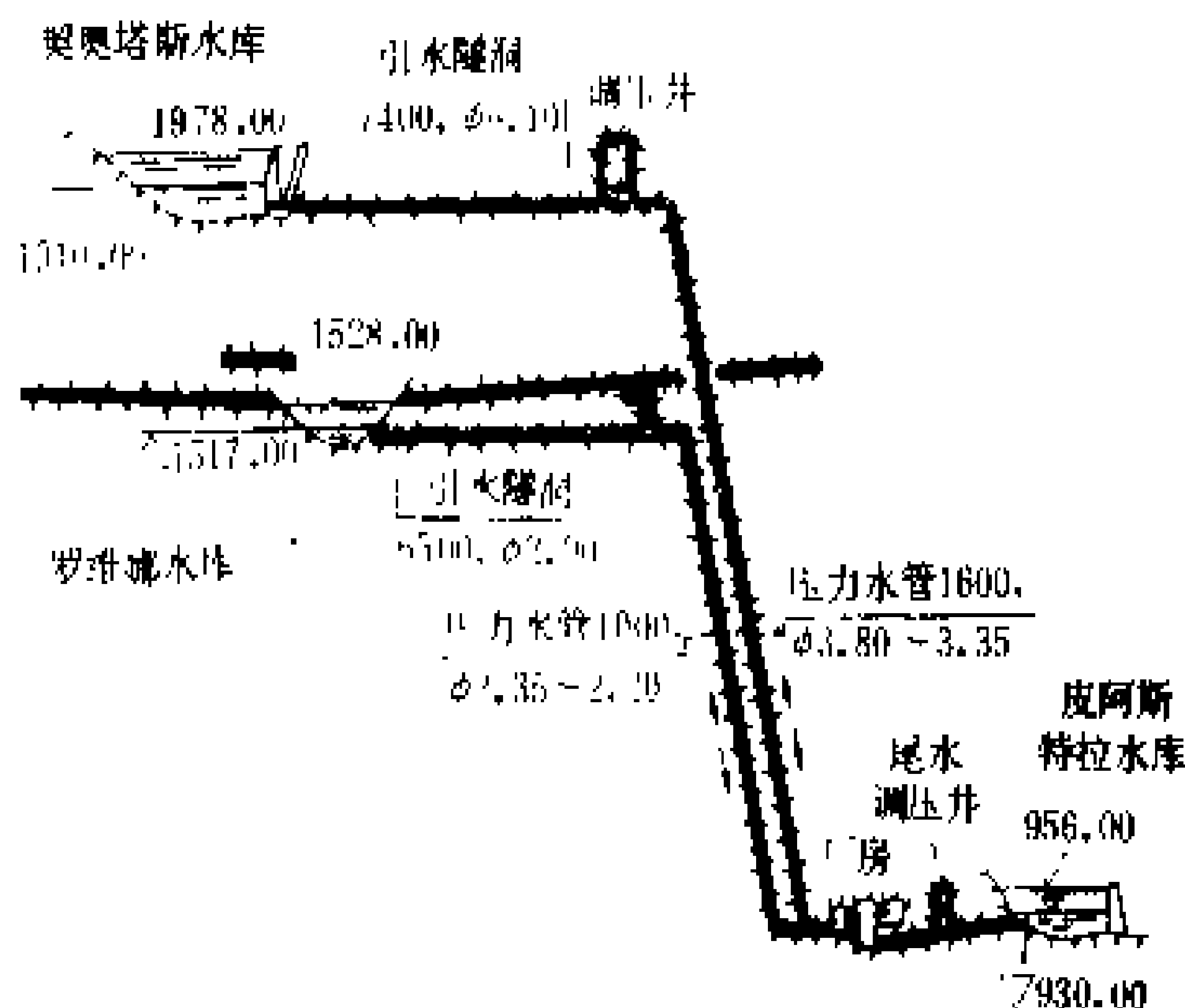


图 2 阿尔托格索抽水蓄能电站纵剖面

上游引水系统 契奥塔斯上水库的发电进水口设在左岸，引水隧洞全长 7400 m，圆形断面，内径 6.1 m，最大发电流量 128 m³/s，最大抽水流量 120 m³/s，末端设双井筒差动式调压井。调压井设计，允许 8 台机组在最大流量发电工况下同时重复停机和起动，并可在抽水工况下突然失电源时，向压力钢管自动补水，缩短机组恢复运行所需的时间。引水隧洞在调压井下游 70 m 处分岔为 2 条压力钢管，钢管内径 3.35~3.8 m，长 1500 m，安装在内径 5.15~5.55 m 的斜井内，坡度 42°。压力钢管壁厚 17~57 mm，用高强度钢板制作。每条压力钢管分成 4 条支管，每条支管与 1 台机组相连接。

罗维娜上水库的引水隧洞全长 6500 m，内径 2.9 m，最大发电流量 27 m³/s，最大抽水流量 20 m³/s，末端设差动式双筒调压井。下接压力钢管全长 1000 m，其内径由 2.35 m 渐减至 2.2 m，壁厚由 9 mm 渐增至 45 mm。钢管的下部 2/3 段用加劲环加固。

地下厂房 地下厂房内安装 9 台抽水蓄能机组，其中 8 台由契奥塔斯上水库引水的为可逆式水泵水轮机，1 台由罗维娜上水库引水的为三机式机组。地下主厂房长 195 m，宽 15.2 m，高 40 m。厂房上游侧设球阀室，长 170 m，宽 9.4 m，高 10 m。厂房下游侧设变压器室，长 168 m，宽 16 m，高 15 m。

尾水输水系统 9 台机组的尾水管汇成 2 条支洞与尾水洞相连接。尾水洞内径 6.5 m，全长 500 m。其上游端设 1 座双井筒差动式调压井，尾水洞出口设在下水库西岸。

机电设备 8 台四级式可逆水泵水轮机。发电工况下最高水头 1048 m, 每台最大流量 $16 \text{ m}^3/\text{s}$, 最大出力 148 MW, 转速 600 r/min。水泵工况下, 最高水头 955 m, 每台最大抽水流量 $15 \text{ m}^3/\text{s}$, 最大输入功率 155 MW。发电电动机的发电功率 170 MV·A, 装有晶闸管励磁装置。

1 台三机式机组, 由发电电动机、混流式水轮机和二级式水泵组成。混流式水轮机, 最大水头 598 m, 最大流量 $26.95 \text{ m}^3/\text{s}$, 最大出力 133.67 MW, 转速 600 r/min。二级式水泵最小扬程 561 m, 最大流量 $19.44 \text{ m}^3/\text{s}$, 抽水功率 124.92 MW。发电电动机容量为 150 MV·A。

变压器洞室内装有 5 台 17 kV/380 kV 的水冷式三相变压器。电站通过 45 km 以外的控制中心实行遥控。

(熊思政)

Ankang Shuidianzhan

安康水电站 (Ankang Hydropower Station)

位于长江支流汉江中游, 陕西省安康县城西 18 km 处, 以发电为主, 兼有航运、防洪、养殖等综合效益。设计装机容量 800 MW, 保证出力 175 MW, 年发电量 28 亿 kW·h。电站以 330 kV 输电线路 3 回和 110 kV 输电线路 4 回接入陕西省电力系统, 担负系统调峰任务。大坝为混凝土重力坝, 最大坝高 128 m。工程于 1978 年开工, 1989 年下闸蓄水, 1990 年第一台机组发电, 1992 年 4 台机组全部投运。

沙率 $1.23 \text{ kg}/\text{m}^3$)。水库正常蓄水位 330 m, 相应库容 25.85 亿 m^3 , 死水位 300 m, 调节库容 16.7 亿 m^3 , 水库具有不完全年调节性能。工程按千年一遇洪水 $36700 \text{ m}^3/\text{s}$ 设计, 万年一遇洪水 $45000 \text{ m}^3/\text{s}$ 校核, 相应库水位分别为 333.10 m 和 337.05 m, 相应泄洪流量分别为 $31500 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $37600 \text{ m}^3/\text{s}$ 。总库容 29.25 亿 m^3 , 调洪库容 3.4 亿 m^3 。电站设计水头 76.2 m, 最大水头 88 m, 最小水头 57 m。

枢纽布置 枢纽主要建筑物有拦河坝、泄洪建筑物、引水发电建筑物和通航建筑物等, 见图。

混凝土重力式拦河坝, 坝轴线由 5 段折线组成, 全长 541.5 m。坝顶高程 338.0 m。坝基主要为震旦系绿绢千枚岩。坝址基本地震烈度为 7 度, 大坝按 8 度设防。

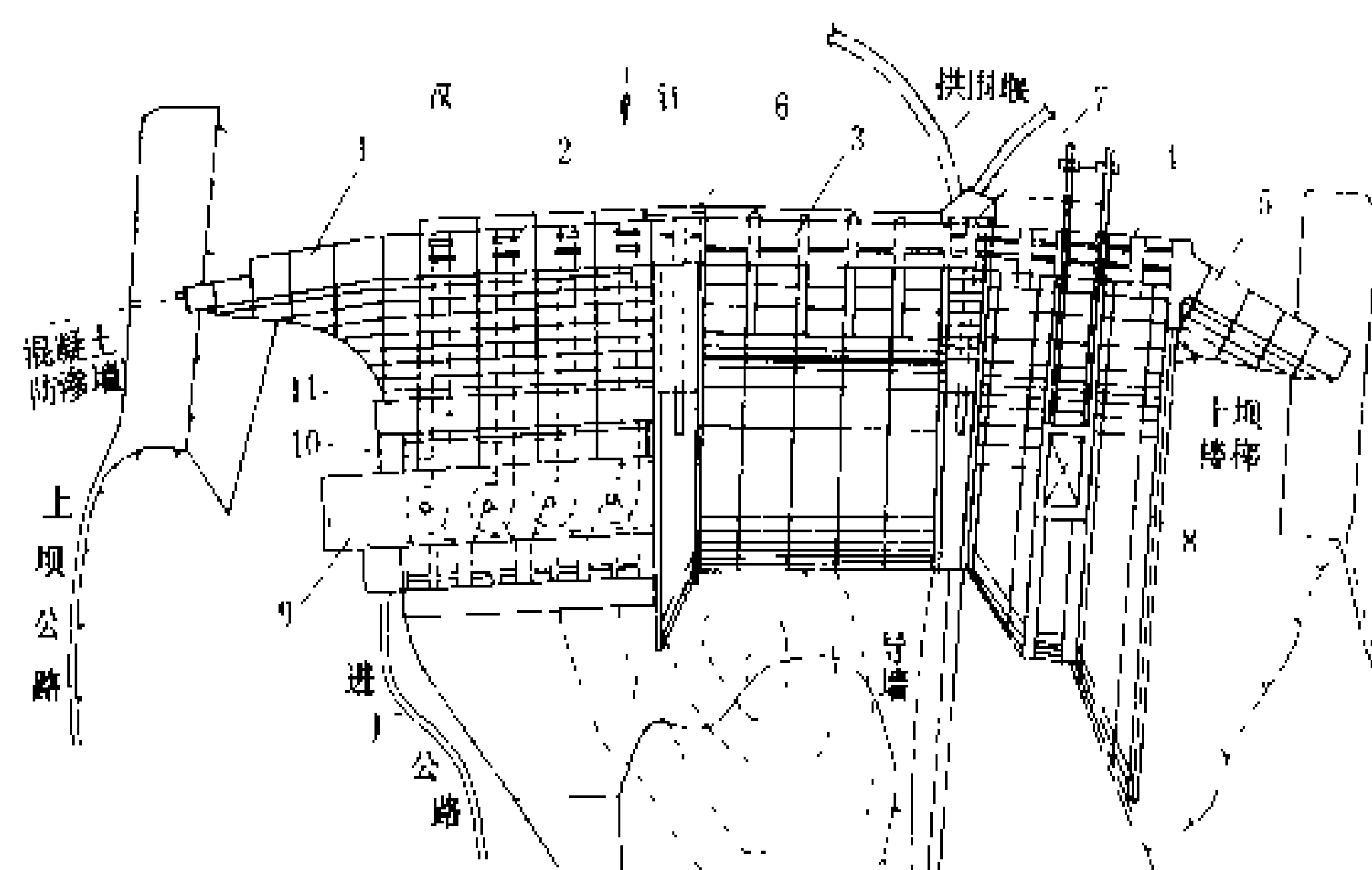
泄洪建筑物有: 溢流坝表孔 5 孔, 孔口尺寸为 $15 \text{ m} \times 17 \text{ m}$, 设计洪水位时, 泄流量 $14010 \text{ m}^3/\text{s}$; 坝身中孔 5 孔, 孔口尺寸为 $11 \text{ m} \times 12 \text{ m}$, 设计洪水位时泄流量 $11123 \text{ m}^3/\text{s}$; 4 个底孔, 孔口尺寸为 $5 \text{ m} \times 8 \text{ m}$, 设计洪水位时泄流量 $4654 \text{ m}^3/\text{s}$ 。上述孔口中, 2 个中孔经左岸溢流道泄入河槽, 4 个底孔分别利用大、小导墙顶部明槽泄入河床。

厂房布置在坝后, 全长 132.5 m, 底宽 47 m, 高 59.6 m。副厂房分布在厂坝之间和尾水平台上。采用气体绝缘金属封闭电器 (参见彩图插页第 29 页 56 图), 布置在厂坝间的配电大楼内。全厂装有 4 台 200 MW 混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径 5.5 m, 额定转速 107 r/min, 额定出力 204.1 MW, 引用流量 $304 \text{ m}^3/\text{s}$ 。发电机为半伞式空冷型, 额定电压 13.8 kV, 额定容量 228.6 MV·A, 额定功率因数 0.875。施工中, 在尾水渠右边墙加装了一台 50 MW 的氟里昂内冷小机组, 其引水管兼作排沙之用。

通航建筑物为垂直升船机, 设计过坝船只为 100 t 级分节驳船, 年货运能力约 30~40 万 t。

大坝深层抗滑稳定措施 坝址区出露岩层为奥陶系、寒武系、震旦系岩层。岩性复杂, 主要是千枚岩、板岩、页岩等。饱和抗压强度一般为 30~60 MPa。断层、裂隙极为发育, 坝址区有断层 100 多条, 经勘探和坝基开挖发现坝基下存在连续面较长的缓倾角 (倾角小于 30°) 断层, 且结构面普遍含泥, 摩擦系数仅 0.3~0.35。在坝趾开挖 15 m 深大齿槽, 以

硐塞混凝土置换坝基下约 10000 m^3 的断层破碎带, 以保证大坝抗滑稳定。



安康水电站枢纽平面布置图

1—右岸非溢流坝段; 2—厂房坝段; 3—表孔坝段; 4—中孔坝段; 5—左岸非溢流坝段; 6—小导墙底孔; 7—大导墙底孔; 8—升船机; 9—厂房; 10—中央控制室; 11—配电大楼

水文和水库特性 坝址以上流域面积 35700 km^2 , 多年平均流量 $608 \text{ m}^3/\text{s}$, 年平均输沙量 2540 万 t (含

坝址岸坡稳定 坝址两岸岩石风化深达 20~60 m,存在十多处天然滑坡体和松动倾倒体。施工开挖中最大边坡高度达 200 m,加上众多断层裂隙切割,边坡产生塌滑的威胁很大。采取设置锚筋桩、混凝土锚固桩等措施,以保证山坡稳定。

泄洪消能 安康水电站洪峰流量大,河床宽仅 200 余 m,坝址又处于河流弯道上,且河床岩性软弱,坝下游河床冲刷较严重。采用宽尾墩与消力池相结合、曲线形贴角斜鼻坎挑流的混合消能方式,提高了消能率,改善了下游流速分布,减轻了冲刷。

工程量 主体工程量为:开挖填筑土石方 797 万 m^3 ,混凝土及钢筋混凝土 329.7 万 m^3 ,金属结构安装 1.16 万 t,基础灌浆和排水孔 21.2 万 m。

设计和施工单位 北京勘测设计院设计,水利电力部第三工程局施工。

(沈义生)

Annaboli Shi Chaoxi Shiyen Dianzhan

安娜波利斯潮汐试验电站 (Annapolis Experimental Tidal Power Station) 为在芬地湾开发大型潮汐电站而建设的试验电站。位于加拿大东海岸芬地湾新斯科舍省安娜波利斯河河口。装有 1 台全贯流式水轮发电机组,额定出力 17.8 MW,年发电量 5000 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。用 69 kV 输电线送电。

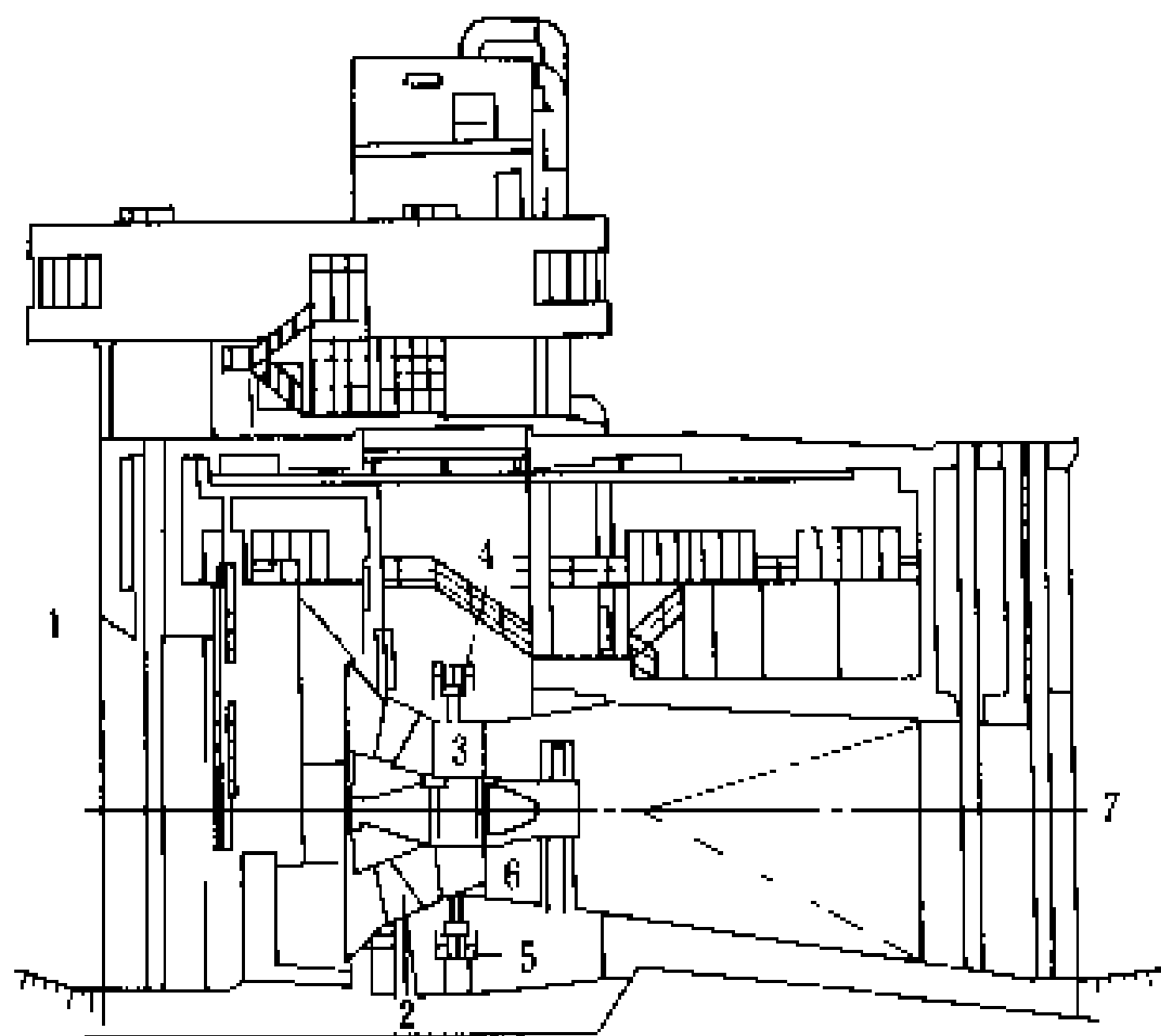
安娜波利斯河口的大潮潮差 8.7 m,小潮潮差 4.4 m,平均潮差 6.4 m。潮汐试验电站利用已有的河口防潮堤和控制闸,水库面积为 12 km^2 ,单向运行。落潮时关闭控制闸,在库水位高于外海水位 1.4~6.8 m 时发电。正常潮汐周期 12 h 25 min 内,约有 6 h 的发电时间。外海涨潮水位高于库水位 0.25~4.0 m 时,海水通过控制闸和空转水轮机进入水库,每个潮汐周期中约有 3 h 的进水时间。其余时间机组不运行。

工程于 1980 年 5 月开工,1984 年 8 月投入运行。

枢纽布置 原有防潮堤长 225 m,设 2 孔控制闸门,各宽 9.2 m,高 7.3 m。另设 1 条过鱼道,无闸门控制,过流能力 80 m^3/s 。地下式厂房布置在防潮堤下,深约 30 m,宽 25 m,长 46.5 m。前设进水口与水库相连,后设尾水道与芬地湾相连。电站主要用来试验全贯流式 (Stratio) 水轮发电机组。厂房剖面见图。

全贯流式机组 转轮直径 7.6 m,额定水头 5.5 m,过流量 378 m^3/s ,转速 50 r/min,飞逸转速 98 r/min,满负荷效率 89.1%,额定容量 17.8 MW。最大水头 7.1 m 时的出力可达 19.9 MW。水轮发电机的转子直接装在水轮机叶片的外缘上。水轮机转轮有 4 个不锈钢叶片,固定焊接在轮毂上,叶片外端焊上“T”形转子外缘,发电机磁极铆在此转子外缘上。为了防止

海水渗入发电机和主轴承,装有可自由调整的高分子材料扇形密封块组成的密封装置,并采用阴极保护以防止金属结构受海水腐蚀。



安娜波利斯潮汐试验电站厂房剖面图

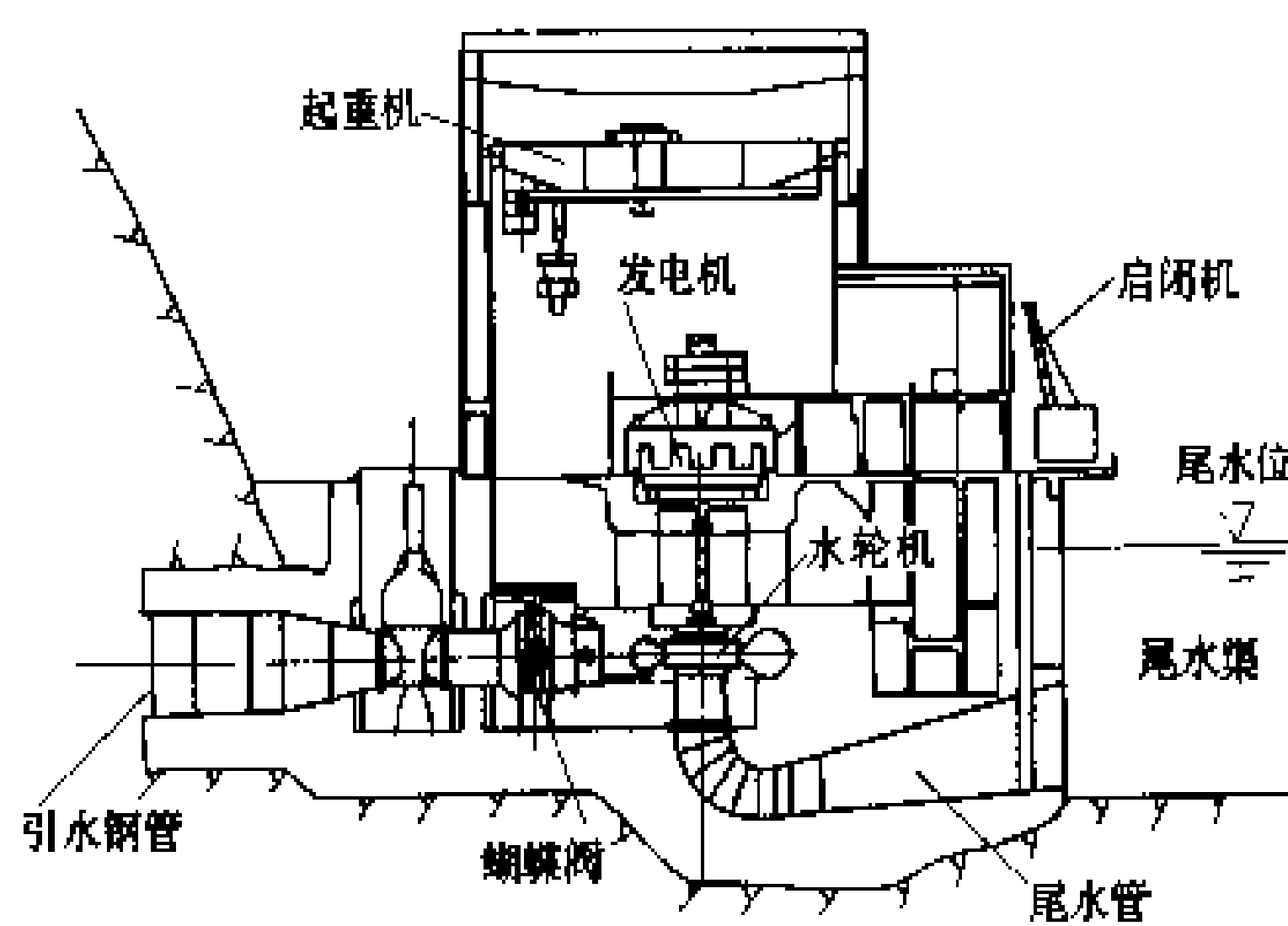
1 水库; 2 导叶; 3 水轮机转轮叶片; 4 发电机转子; 5 发电机定子; 6 水压密封; 7 外海

(陆钦侃)

anbianshi changfang

岸边式厂房 (power house on river bank)

位于坝下游河岸边的地面厂房。岸边式厂房横剖面见图。



岸边式厂房横剖面图

引水道及压力管道有的埋设于地下,有的明铺于地面。当引水道及压力管道较长或由主干压力管道向多台机组引水时,通常在每台水轮机前的压力管道上装置有闸阀,以供机组检修或紧急状态时快速关闭,切断水流。闸阀型式根据水头大小及管道直径选择,有蝴蝶阀、球阀或平面闸阀,它们有的安装在主厂房内,有的安装在专门阀室内,阀室中配备有专用的吊装机械。

厂房位置根据引水系统布置、厂址地形、工程地质条件以及可获得水头多少等情况,经技术经济比较确

定。当水电站主要由拦河坝壅水集中河道落差时,厂房靠近拦河坝,引水道长度短;当水电站主要由引水道来集中河道落差时,引水道较长,通常设有调压室,若以明流引水,必须在压力管道首部设置压力前池,以调节水流。副厂房、主变压器场、屋外开关站根据厂区地形、地质及对外交通等情况因地制宜布置,一般可以选择下列部位:①厂房端部进厂交通道路近旁场地;②尾水管扩散段上部和尾水平台;③厂房与山坡之间可利用空间。也有的将开关站设在厂房屋顶上。

规划设计厂区时要注意:①位于高边坡的岸边厂房,要对边坡的稳定性进行论证,确定必须采取的工程措施,预防滑坡及危岩坠落。有的厂房屋顶采用承重结构,设有耐坠石冲砸的垫层。②对可能遭受山洪、泥石流破坏的建筑物和交通道路等设施应采取相应的治理防护措施。③交通道路设施要满足各建筑物管理和设备搬运需要。④根据本地区暴雨强度设置排水沟网及排水设施。⑤尾水渠与河道连接要避免发生有碍发电的回流、淤积和河水顶托。大中型水电站尾水渠布置要通过水工模型试验以优化设计。

(李必如)

较大的溢流前缘长度时,可顺岸边布置侧槽溢洪道,以便加长进流长度。这种溢洪道的布置和水力条件均较正槽溢洪道复杂,其溢流前缘底部宜稍加深以保证侧堰流态稳定,侧槽尺寸和底坡应满足消能和水流转向、平稳进入陡槽的要求。侧堰可设闸门也可不设。井式溢洪道属岸边溢洪道的特殊布置型式,其进水堰轴线为环形或弧形,水流经环形进水堰流入竖井,下接隧洞。

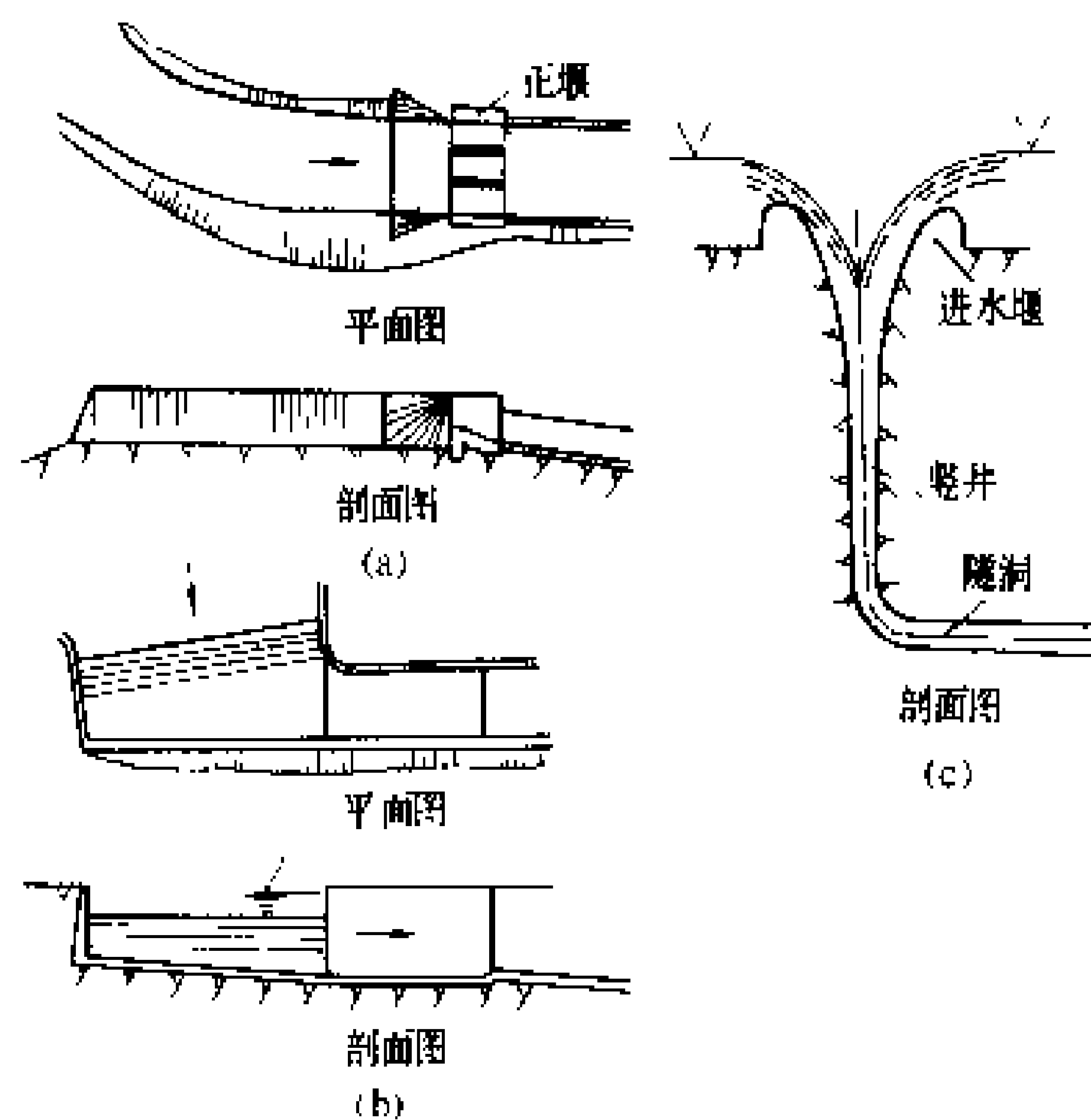


图1 岸边溢洪道布置

(a) 正槽溢洪道; (b) 侧槽溢洪道; (c) 井式溢洪道

上游引水渠 沟通水库和控制段之间的连接渠道,应有足够的过水断面和合理的线路布置,尽量减少水头损失;为保证水流均匀进入控制段,在其上游应有一段直线段。

控制段 起控制溢洪道下泄流量的作用。控制段也是挡水结构,因此应按闸坝建筑物设计,堰体结构应满足稳定及应力要求和基础防渗要求。控制段按堰流方式区分有:平底闸室(宽顶堰)、驼峰式低堰、标准实用堰,见图2。堰顶可设或不设闸门。闸门上可设或不设胸墙。当设多孔闸门时宜均匀同步开启,以防陡槽内出现较大的冲击波,水流翻越边墙造成危害。

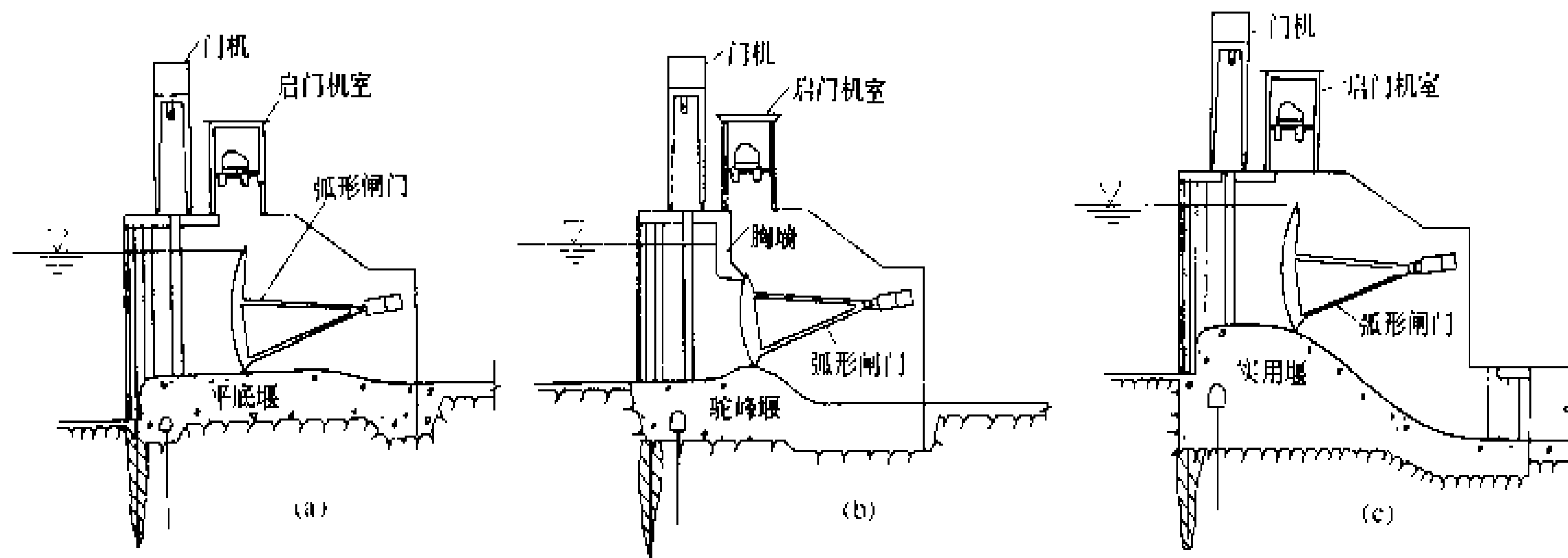


图2 控制段布置

(a) 平底闸室(宽顶堰); (b) 驼峰式低堰; (c) 标准实用堰

泄流段 控制段下游通过高速水流的水道。它根据不同的布置和地形条件有滑雪道、陡槽和隧洞 3 种型式。滑雪道是将泄水道支承在高出岸坡的混凝土构架或实体结构上,岸坡开挖较少。陡槽是建基在岸坡岩体上的泄水道,其过水表面用混凝土衬护,水面以下的边坡一般为垂直或接近垂直,对水流条件和节省开挖均有利。当岸坡高陡时,泄流段也可采用无压隧洞的形式。泄流段在平面布置上均宜采用直线,只有在受地形限制,为使水流顺利归槽时才采用弯道布置。弯道半径不宜太小,并应设渠底横向坡以减少弯道水流冲击波。弯道半径和渠底横坡只适应一定流量,当流量变化时流态将不够好,但应满足对建筑物安全要求。泄流段一般采用沿长度等宽布置,也可采用逐渐收缩的布置以减少工程量,或采用逐渐扩散的布置以减少出口消能的单宽流量。

消能工 岸边溢洪道常采用挑流消能,除造价可以节省外,其消能冲刷区远离坝址和厂房,挑流所造成的河床冲刷、雾化、回流及水位波动等问题对主体工程影响较小。其它消能方式在地形地质条件适合时也可采用,但造价较高。

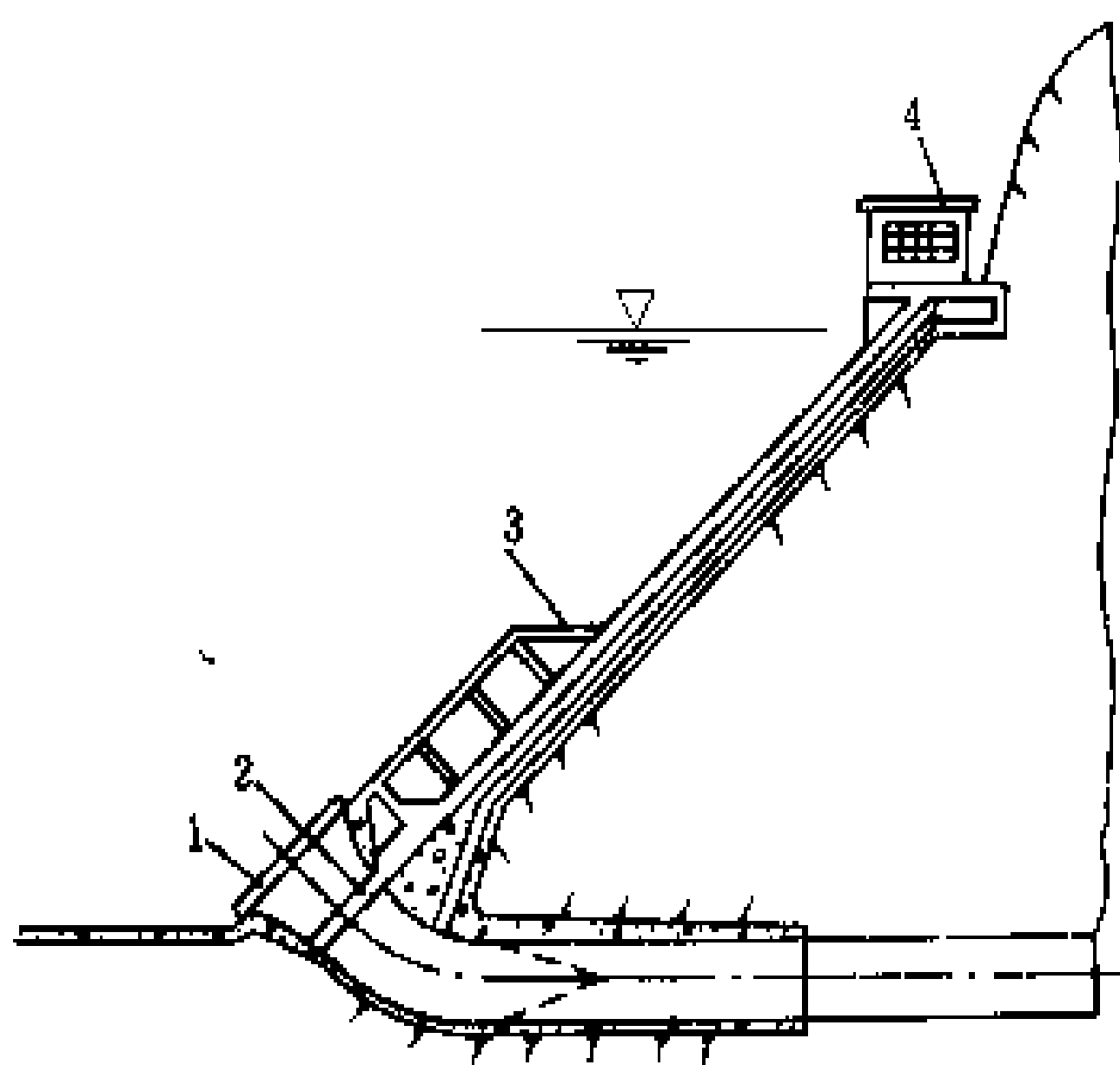
下游退水渠 是消能工至下游河槽之间的连接水道。

岸边溢洪道的消能工和泄流段衬护应注意防止汽蚀和动水压力掀动破坏,除需做好表面施工平整外,尚应在衬砌分缝处设止水并在基础下设排水措施。

(林可冀)

anposhi jinshuikou

岸坡式进水口 (slope intake) 闸门装置在倾斜岸坡上的深孔式进水口。拦污栅沿岸坡设置在



岸坡式进水口剖面图

1 拦污栅; 2—闸门槽; 3 清污平台; 4—启闭机室

喇叭口前,有时可与检修闸门同槽。事故闸门启闭时,沿岸坡所设的轨道或门槽上下移动。启闭机工作平台建在最高库水位以上的岸边,岸坡式进水口见图所示。

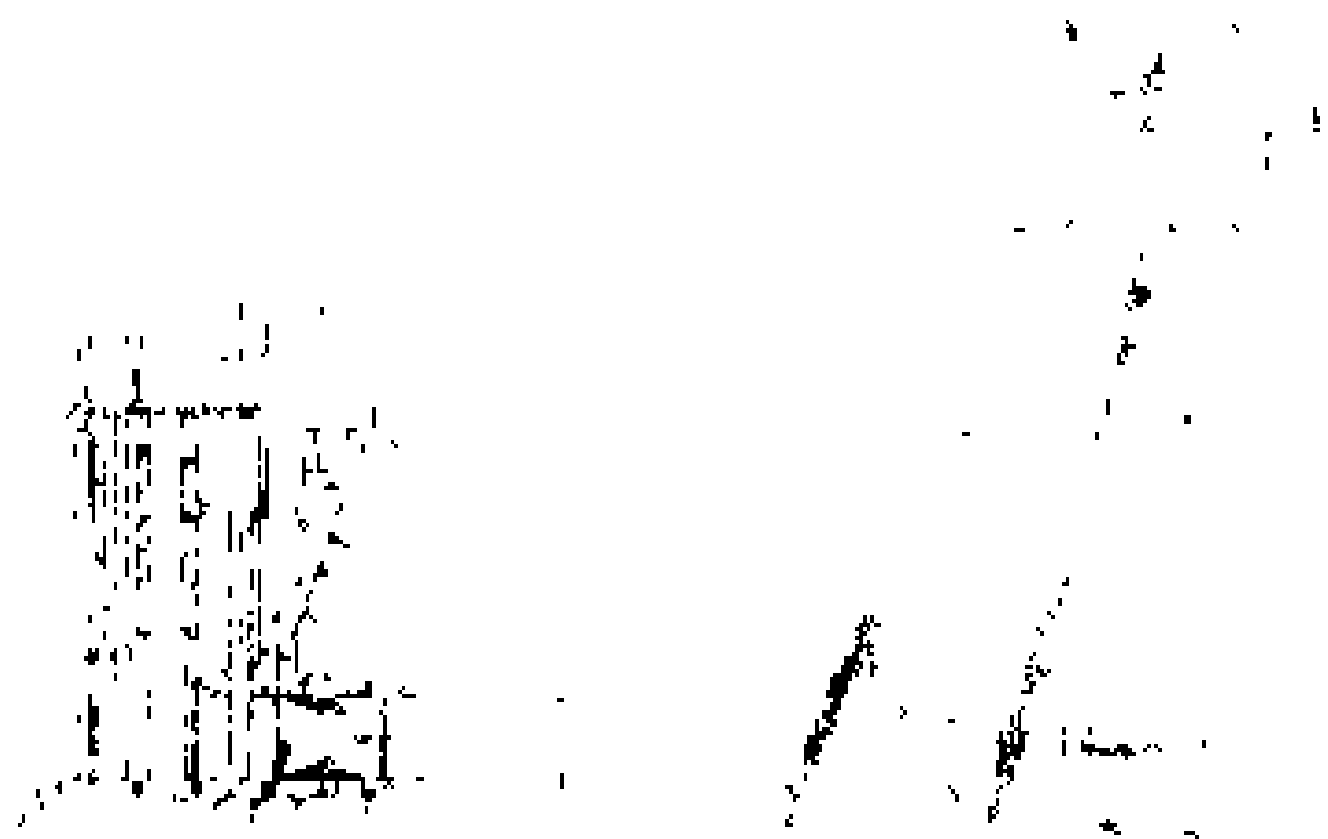
岸坡式进水口利用岸坡布置闸门,既不需在库岸开挖竖井,又不需建造岸塔,布置最简单,工程量最小;但要求岸坡坡度适当,地质条件较好,适用于引用流量较小的水电站。

(丁志华)

antashi jinshuikou

岸塔式进水口 (tower intake at bank side)

靠近水库岸边具有塔形结构的深孔式进水口。塔形结构底座设有闸门室,其上游布置取水喇叭口。塔身作为拦污栅和闸门的支承结构和升降通道。塔顶在最高库水位以上,作为启闭机的工作平台。根据地形条件,塔身可自下而上全部紧靠库岸;也可下部紧靠库岸,上部与库岸分离,在分离处部分或全部回填混凝土,以加大库岸对塔身的支承范围。部分回填时,塔顶与库岸由交通桥连接。按塔的形状分为直立式岸塔和倾斜式岸塔(见图)。



岸塔式进水口剖面图

(a) 直立式岸塔; (b) 倾斜式岸塔

1 拦污栅; 2 检修闸门槽; 3—事故闸门槽; 4 门机;
5 启闭机室

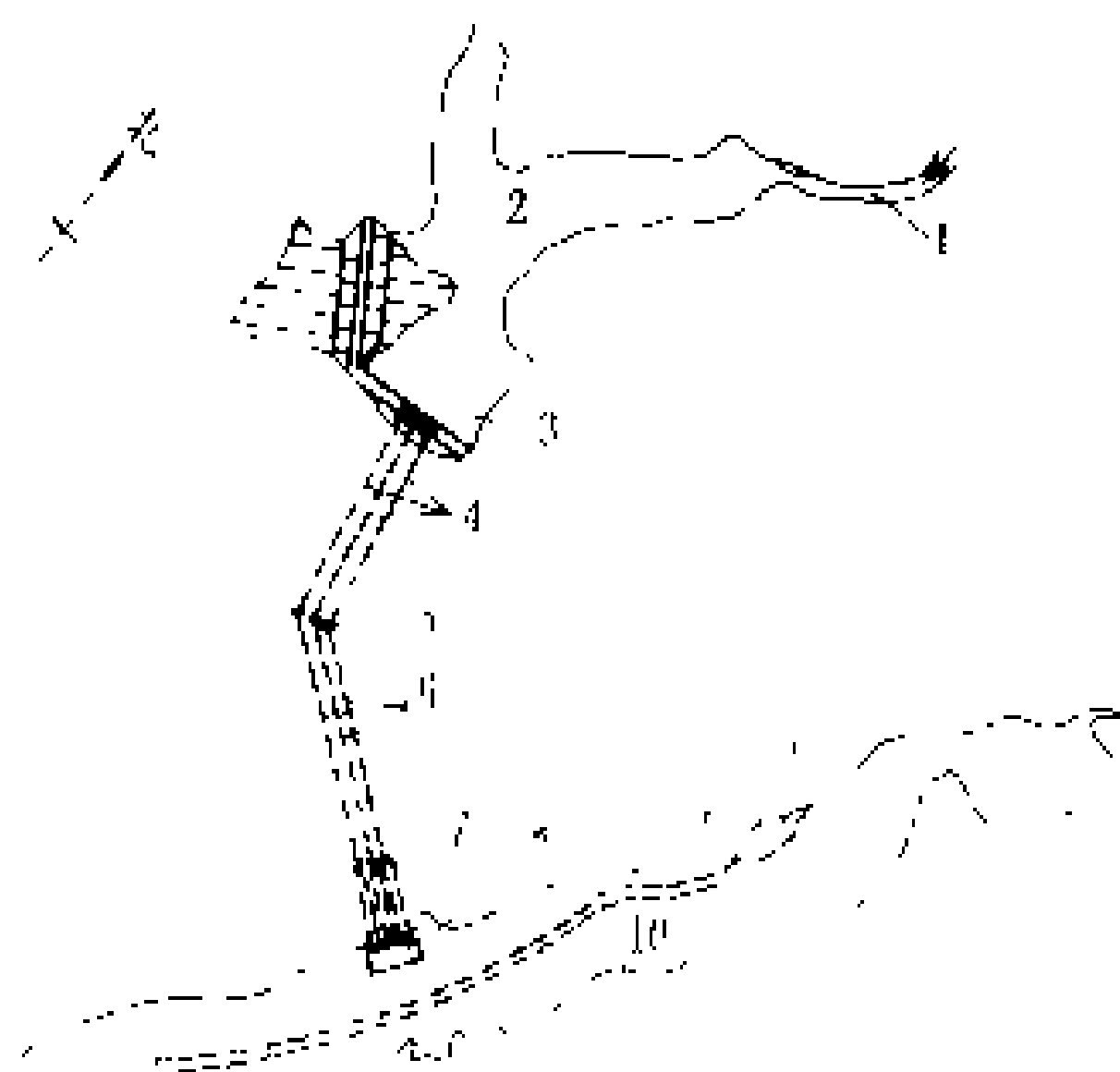
岸塔式进水口由于有库岸的支承,与独立于水库中的塔式进水口相比,在风浪、冰冻和地震的作用下,有较好的稳定性和强度;由于喇叭口布置在塔内,可减小进洞的开挖跨度,有利于地质条件不良的围岩稳定;拦污栅和闸门也都设在塔内,布置灵活,管理方便。但结构复杂,工程量较大。

(丁志华)

B

Basikangdi Choushui Xu'nerg Dianzhan

巴斯康蒂抽水蓄能电站 (Bath County Pumped Storage Power Station) 纯抽水蓄能电站。位于美国弗吉尼亚州西部山区,装机容量 2100 MW,是当前世界最大的抽水蓄能电站。用 2 回 500 kV 超高压输电线路接入弗吉尼亚电力系统,输电距离分别为 56 km 和 86 km。工程于 1977 年开工,1985 年竣工。工程总布置见图。



巴斯康蒂抽水蓄能电站平面布置图

1—小巴克溪;2—上水库;3—进水口;4—上段隧洞;5—调压井及竖井;6—下段隧洞;7—压力管道;8—封闭式地面厂房;9—巴克溪;10—下水库

上水库和下水库 在小巴克溪 (Little Back Creek) 建土石坝形成上水库。坝高 146 m, 坝顶长 670 m。设有自溃式非常溢洪道, 宽 79 m, 高 3 m。上水库正常蓄水位 1012 m, 总库容 4380 万 m^3 ; 死水位 980 m, 调节库容 2775 万 m^3 , 水库蓄能 2370 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 日调节水位最大变幅达 32 m。

下水库 位于巴克溪。土石坝高 56 m。坝顶长 690 m。溢洪道 2 孔, 每孔净宽 9.7 m, 高 9.14 m, 最大泄洪能力 1700 m^3/s 。坝下设有底孔, 泄水能力 8.5 m^3/s 。正常蓄水位 645.7 m, 发电低水位 627.4 m, 相应库容 3764 万 m^3 , 调节库容 2775 万 m^3 。正常蓄水位以上留有防洪库容 310 万 m^3 , 发电低水位下留有下游用

水保留库容 395 万 m^3 和死库容 284 万 m^3 。上、下水库之间引水距离 2.5 km, 可利用水头 327~390 m。

引水系统 上水库进水口和厂房尾水闸的拦污栅, 栅条间距 150 mm, 都按双向流水设计。进水口拦污栅抽水时最大流速限制为 0.6 m/s, 尾水闸拦污栅发电和抽水时最大流速分别限制为 0.9 m/s 和 0.85 m/s。由上水库引水的 3 条压力隧洞, 直径 8.7 m, 混凝土衬砌厚 0.6 m, 上段长 1085~1115 m, 经竖井深 302 m, 接下段长 972~1109 m。上下段隧洞的纵向坡度为 2%。在每个竖井上游侧设调压井, 直径 13.4 m, 高 106 m。竖井和调压井的衬砌厚 0.84 m。3 条压力隧洞的末端分岔为 6 条压力管道, 直径 5.4 m, 长 262~268 m, 用钢板衬砌, 钢板厚 25~50 mm。

厂房 封闭式地面厂房设在下水库坝上游 1.6 km 处的岸边, 厂房后的边坡用土回填至与厂房顶相平。厂房长 150 m, 宽 45 m, 高 61 m, 安装 6 台单机容量为 350 MW 的可逆式抽水蓄能机组 (参见彩图插页第 26 页 49 图)。

抽水蓄能机组 水泵水轮机的转轮直径 6.35 m, 转速 257.1 r/min, 吸出水头 -25 m。水轮机工况: 额定水头 329 m 时, 出力 380 MW, 流量 130 m^3/s 。最大水头 390 m 时, 出力可达 457 MW, 是当前世界出力最大的水泵水轮机。水泵工况: 额定扬程 335 m 时抽水流量 116 m^3/s , 最大扬程 387 m 时抽水流量 85 m^3/s 。发电电动机额定容量为 389 MV·A, 功率因数 0.9, 电压 20.5 kV, 频率 60 Hz。厂房顶设 3 组单相变压器组, 每组容量 900 MV·A。每 2 台机组接入 1 组单相变压器组, 升压至 500 kV。

工程投资 1977 年开工时估价, 包括施工期利息和物价上涨部分为 7.85 亿美元。1985 年建成时总造价达 16.5 亿美元, 单位投资 786 美元/kW。

(陆钦侃)

00

坝 (dam) 截断河流用以拦蓄或调节水流、抬高水位的挡(壅)水建筑物。坝是利用和控制水流的关键建筑物。它所形成的水库, 可调节径流、控制下泄洪水, 为发电、防洪、灌溉、供水、航运等提供有利条件。有的坝形成水库的库容很小, 调节水流的作用甚微, 一般用于径流发电、改善航道等。早期筑坝的目标比较单一。现代筑坝多以某项目标为主, 兼顾多种综合利用要求。

坝用土石、砌石、混凝土等材料筑成。建坝要选择适宜的坝址。坝基应稳固、渗透性低。坝和坝基内一般均设有防渗和排水设施, 以减少水库渗漏及坝和坝基的稳定性。坝和坝基的连接应可靠, 特别应重视它们的

防渗体的连接。坝的主要部位有：坝体、坝顶、上下游坝面、坝基面、坝肩、坝踵、坝趾等（图1）。坝体是坝的顶面、上下游坝面和坝基面所包围的实体。坝顶是坝的顶部结构，包括路面、防浪墙、栏杆、排水沟、灯柱等。坝基面是坝与坝基的接触面。坝的两岸附近坝基称为坝肩。上游坝面与坝基的交接处称为坝踵。下游坝面与坝基的交接处称为坝趾。坝的长度可用坝顶长代表。坝的高度可用坝高代表。坝高是坝的最低建基面至坝的顶面的高差。

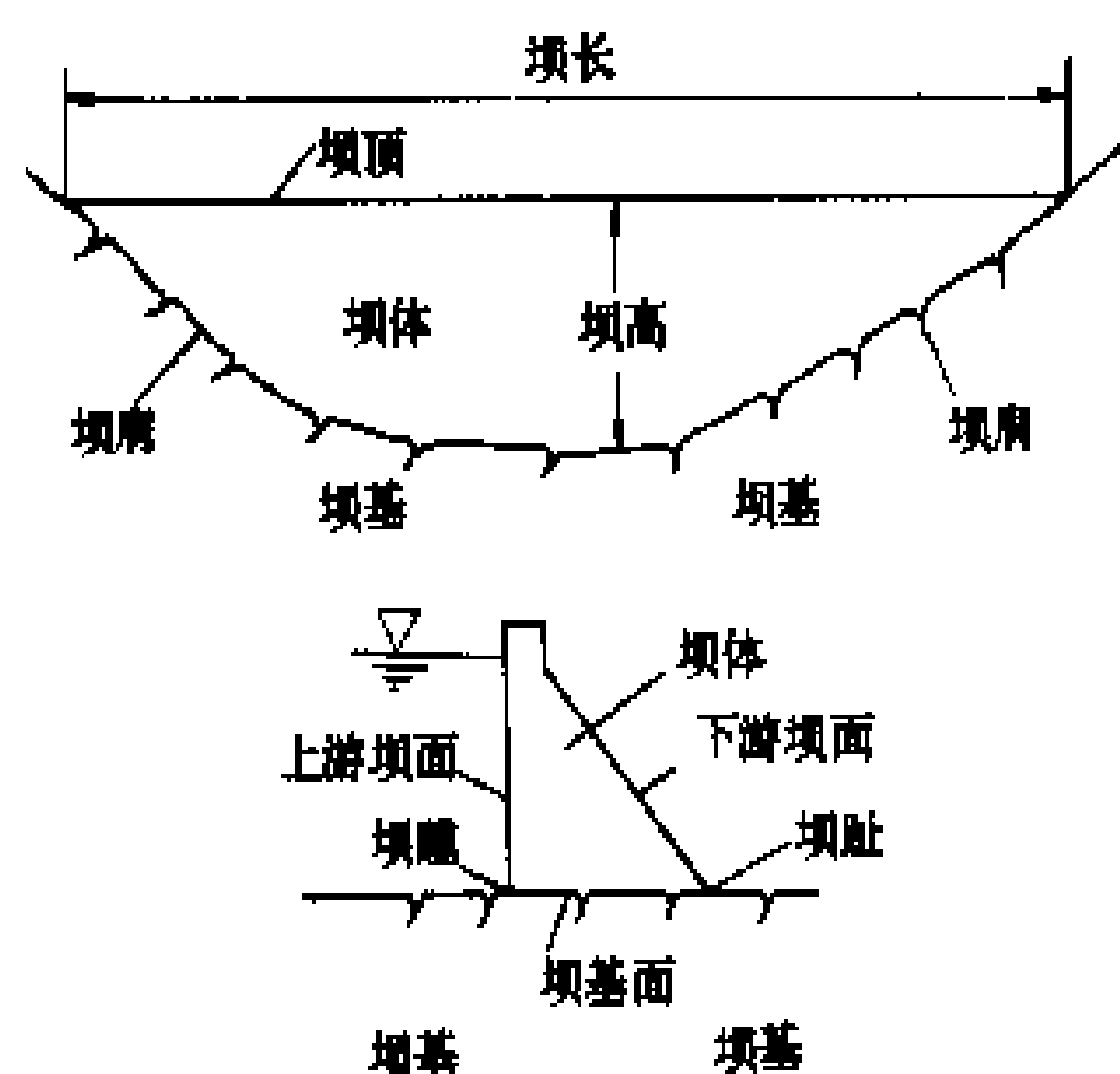


图1 坝的示意图

类型 ①按筑坝的主要材料分有：混凝土坝、砌石坝、土石坝。②按结构和力学特点分，混凝土坝和砌石坝有：重力坝（包括宽缝重力坝和空腹重力坝）、拱坝（包括空腹拱坝）、支墩坝（包括大头坝、平板坝和连拱坝）。按力学特点土石坝属重力式，即借坝体自重抵抗库水压力的推力作用。③按泄水条件分有：可泄水的坝和非泄水的坝。混凝土坝和砌石坝可建成可泄水的坝（包括溢流坝、有坝身泄水孔的坝）或非泄水的坝。土石坝多为非泄水的坝。可泄水的土石坝（包括坝顶泄水、坝下埋管泄水）多用于小型或临时性工程。④按施工方法分，对于混凝土坝有：常规方法浇筑的混凝土坝、碾压混凝土坝、预制混凝土构件装配而成的坝。对于土石坝有：碾压坝、水力冲填坝、水中倒土坝、定向爆破坝等。过去的抛填式堆石坝已为碾压式堆石坝所代替。⑤按坝高分有：低坝、中坝和高坝（中国设计规范规定：坝高30m以下为低坝，30~70m为中坝，70m以上为高坝）。⑥按坝的位置分，当坝截断河谷和地形垭口时，截断河谷的坝称拦河坝或主坝，截断垭口的坝称副坝。有的拦河坝向一岸或两岸延伸很长，也有人将岸边延伸的这部分坝体称为岸边副坝。

坝的主要类型有重力坝、拱坝、支墩坝及土石坝等，见图2。

坝的设计 主要步骤和内容有：①充分掌握水文、泥沙、地形、地质等基本资料，查明坝址和库区的工程地质和水文地质条件。②正确选定坝址和坝型。③确定

坝顶高程。根据规划选定的正常蓄水位等各种特征水位和规范规定的洪水标准以及枢纽中的泄洪建筑物规

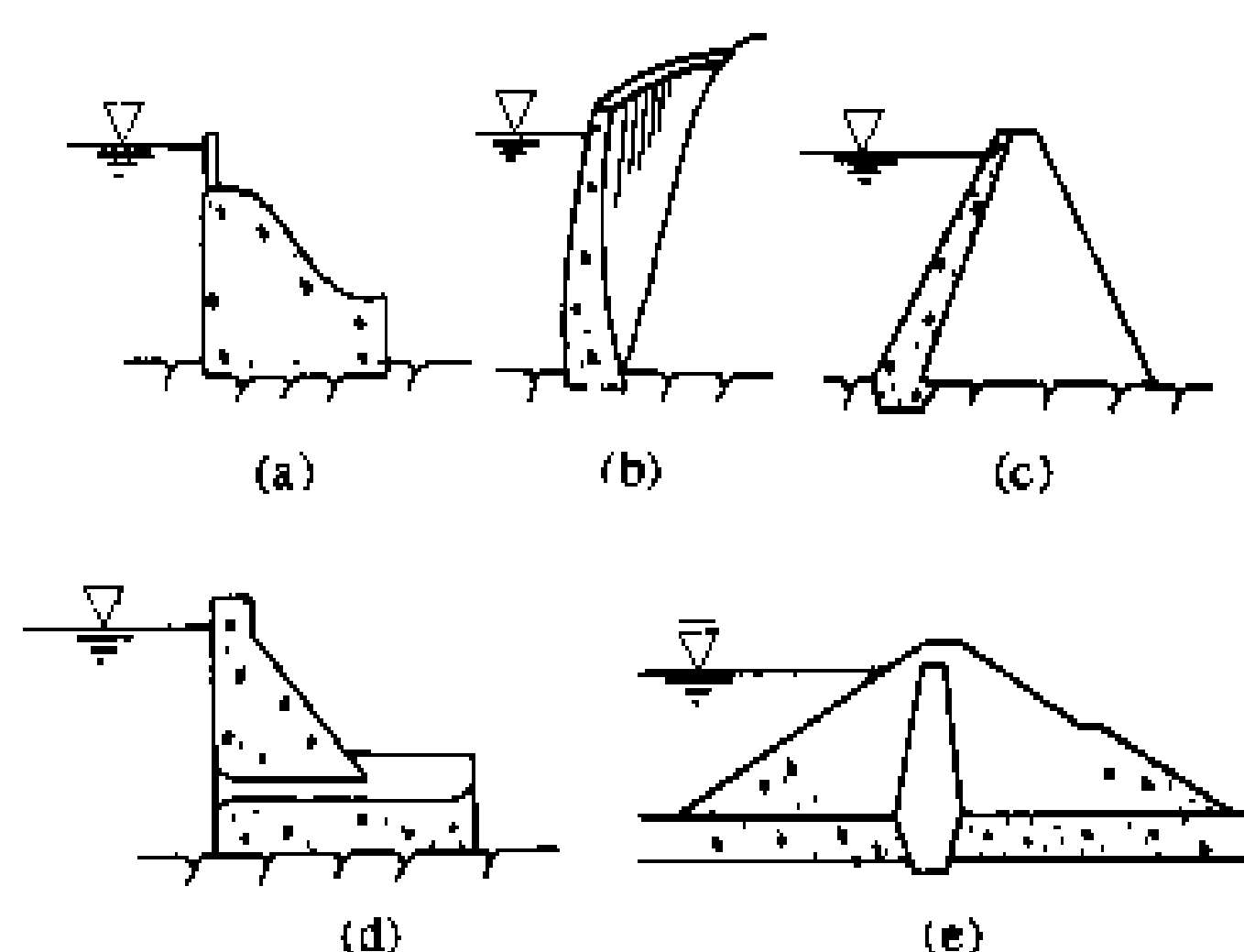


图2 坝的主要类型

(a) 重力坝（溢流坝）；(b) 拱坝（非泄水的坝）；(c) 支墩坝（非泄水的坝）；(d) 重力坝（有坝身泄水孔的坝）；(e) 土石坝（非泄水的坝）

模，确定设计洪水位和校核洪水位。为了保证坝顶不漫水并有一定安全裕度，一般在正常蓄水位、设计洪水位、校核洪水位三者之上分别加相应标准的波浪高度（或爬高）及坝顶安全超高，由三者中所得高程最高者确定为坝顶高程。④进行坝的平面和剖面布置。⑤确定坝承受的载荷（主要有坝体自重、水压力、渗压力、浮托力、浪压力、张压力、泥沙压力，以及温度应力、地震应力等）以及载荷组合。⑥进行坝的结构设计，要求坝体在各种可能的载荷组合下具有足够的强度和稳定安全系数。⑦进行坝基设计，对坝基中存在的缺陷进行必要的坝基处理设计。⑧进行水力计算和泄洪消能设计。⑨根据计算分析成果对坝的布置和体形加以优化，最终选定。⑩进行坝的原型观测设计和提出监视要求。

坝的施工 见混凝土坝施工和土石坝施工。

简史及发展趋势 人类很早就利用土、石等材料修建土石坝及重力坝。埃及尼罗河上的考赛施（Kosheish）干砌石坝遗迹据考证是公元前2900年修建的。该坝坝高15m，坝顶长240m。公元3世纪在现在法国地方修建了坝高12m的鲍姆（Borm）砌石圆筒拱坝。16世纪西班牙修建埃尔赫（Elche）砌石连拱坝。公元前250年左右，中国四川岷江都江堰工程使用了竹笼填石的溢流坝。公元初开始用石灰浆砌石修筑砌石重力坝。

19世纪以前，人们一直按经验用土、石及石灰等材料筑坝，常遭水流冲毁。19世纪以后，开始用混凝土筑坝。1853年法国工程师S. 萨兹里（S. Sazilly）提出了分析重力坝结构的原理。1861~1866年法国用新法设计建成了坝高52m的佛兰斯（Furens）重力坝，设计中考虑了扬压力的作用，保证了坝的安全。

Ba 坝

20 世纪初期钢筋混凝土支墩坝得到较快的发展。20 世纪 30 年代有了较完善的拱坝设计理论。40 年代以后土石坝的设计理论日趋完善。1916 年美国建成了坝高 106 m 的箭石 (Arrow Rock) 混凝土重力坝, 在坝内近上游面设置了排水管和横向伸缩缝, 在坝基内设灌浆帷幕及幕后排水幕以减少坝基渗透, 降低扬压力, 防止坝体开裂, 使重力坝的构造日趋完善。20 世纪 30 年代美国建成了坝高 221.4 m 的胡佛 (Hoover Dam) 混凝土拱形重力坝。185 m 的沙斯塔 (Shasta) 重力坝的修建, 创造和积累了一整套混凝土坝设计、施工的实践经验。目前世界上最高的重力坝是瑞士于 1962 年建成的大狄克逊 (Grand Dixence) 坝, 坝高 285 m。20 世纪 50 年代中叶以后在法国、意大利、葡萄牙、西班牙、瑞士、日本、苏联等国修建了很多拱坝, 特别是双曲薄拱坝发展很快。目前世界上最高的拱坝是苏联 1984 年建成的英古里 (Ингуль) 拱坝, 坝高 272 m。最高的支墩坝是加拿大 1968 年建成的丹尼尔·约翰逊 (Daniel Johnson) 连拱坝, 坝高 214 m。60 年代以后土石坝建设进入发展的现代阶段。最高的土石坝是苏联 1980 年建成的努列克 (Нурек) 坝, 坝高 300 m。到 80 年代末, 坝高 200 m 及以上的坝已建成 28 座 (详见表 1)。

1949 年以后, 中国的坝工建设才得到大的发展。

1954 年和 1956 年相继建成坝高 74.4 m 的佛子岭连拱坝和坝高 88.2 m 的梅山连拱坝。1960 年和 1961 年建成 4 座坝高 100 m 以上的高坝 (三门峡重力坝坝高 106 m, 新安江宽缝重力坝坝高 105 m, 新丰江大头坝坝高 105 m, 柘溪大头坝坝高 104 m)。到 1990 年中国境内已建成坝高 100 m 以上的坝 28 座, 其中重力坝 9 座, 占 32%, 最高的是乌江渡拱形重力坝, 坝高 165 m; 拱坝 8 座, 占 28.6%, 最高的是台湾省的德基拱坝, 坝高 181 m; 土石坝 7 座, 占 25.0%, 最高的是台湾省的曾文土石坝, 坝高 136.5m; 支墩坝 3 座, 占 11%, 最高的是湖南镇梯形支墩坝, 坝高 129 m; 砌石坝 1 座, 占 3.4%, 最高的是群英砌石拱坝, 坝高 100.5 m (详见表 2)。中国正在修建坝高 240 m 的二滩双曲拱坝。

19 世纪 60 年代以来 100 多年内, 世界上建成的坝高 30 m 以上的坝中, 重力坝最多, 约占 45%, 其次是土石坝、拱坝和支墩坝。20 世纪 60 年代以后, 高土石坝的比重不断增加; 高拱坝得到迅速发展; 特别是由于大型施工机械和振动碾的采用, 出现了混凝土面板堆石坝和碾压混凝土坝两种新坝型, 显示出优越的技术经济指标。目前筑坝技术日益先进, 设计、施工水平不断提高, 加以科学化的管理, 缩短了前期工作和施工建设的周期, 降低了工程造价。

表 1 世界已建成的 200 m 以上高坝统计表

序号	坝 名	所属国家	坝高 (m)	坝 型	建成年份
1	努列克 (Нурек)	苏 联	300	土 石 坝	1980
2	大狄克逊 (Grand Dixence)	瑞 士	285	重 力 坝	1962
3	英古里 (Ингуль)	苏 联	272	拱 坝	1984
4	瓦依昂 (Vajont)	意 大 利	262	拱 坝	1961
5	奇科森 (Chicoasen)	墨 西 哥	261	土 石 坝	1981
6	基晓 (Kishau)	印 度	253	土 石 坝	1985
7	萨扬-舒申斯克 (Саяно-Шушенск)	苏 联	242	重力拱坝	1980
8	瓜维约 (Guavio)	哥伦比亚	243	土 石 坝	1986
9	迈卡 (Mica)	加 拿 大	242	土 石 坝	1973
10	莫瓦桑 (Mauvoisin)	瑞 士	237	拱 坝	1957
11	契伏 (Chivor)	哥伦比亚	237	土 石 坝	1975
12	契尔克 (Чиркей)	苏 联	233	拱 坝	1978
13	奥洛维尔 (Oroville)	美 国	230	土 石 坝	1968
14	巴克拉 (Bhakra)	印 度	226	重 力 坝	1963
15	卡约 (ElCajon)	洪都拉斯	226	拱 坝	1985
16	胡佛 (Hoover)	美 国	221.4	拱形重力坝	1935
17	康特拉 (Contra)	瑞 士	220	拱 坝	1965
18	姆拉廷耶 (Mratinje)	南斯拉夫	220	拱 坝	1975
19	德沃夏克 (Dworshak)	美 国	219	重 力 坝	1974
20	格林峡 (Glen Canyon)	美 国	216	拱 坝	1964
21	托克托古尔 (Токтогул)	苏 联	215	重 力 坝	1978
22	丹尼尔·约翰逊 (Daniel Johnson)	加 拿 大	214	连 拱 坝	1968

续表

序号	坝 名	所属国家	坝高 (m)	坝 型	建成年份
23	德兹 (Dez)	伊 朗	213	拱 坝	1962
24	卢重 (Luzzone)	瑞 士	208	拱 坝	1963
25	凯班 (Keban)	土 耳 其	207	土石坝·重力坝	1974
26	阿尔门德拉 (Almendra)	西 班 牙	202	拱 坝	1970
27	卡伦 (Karun)	伊 朗	200	土 石 坝	1975
28	高勃林 (Kolbrein)	奥 地 利	200	拱 坝	1977

表 2 中国建成的 100m 以上的坝统计表

序号	工程名称	所在省区	坝 高 (m)	坝 型	建 成 年份
1	德基	台湾	181	拱 坝	1974
2	龙羊峡	青海	178	重力拱坝	1990
3	乌江渡	贵州	165	拱形重力坝	1983
4	东江	湖南	157	拱 坝	1991
5	白山	吉林	149.5	重力拱坝	1986
6	刘家峡	甘肃	147	重力坝	1969
7	曾文	台湾	136.5	土石坝	1973
8	石门	台湾	133	土石坝	1964
9	湖南镇	浙江	129	梯形支墩坝	1979
10	安康	陕西	128	重力坝	1992
11	翡翠	台湾	122.5	拱 坝	1986
12	吴溪	台湾	114	拱 坝	1959
13	石头河	陕西	114	土石坝	1982
14	云峰	吉林	113.75	重力坝	1965
15	凤滩	湖南	112.5	空腹重力拱坝	1978
16	潘家口	河北	107.5	重力坝	1980
17	黄龙滩	湖北	107	重力坝	1974
18	高岛东坝	香港	107	土石坝	
19	三门峡	河南	106	重力坝	1960
20	冰丰	辽宁	106	重力坝	1941
21	新安江	浙江	105	重力坝	1960
22	新丰江	广东	105	大头坝	1960
23	柘溪	湖南	104	大头坝	1961
24	高岛西坝	香港	102.5	土石坝	
25	紧水滩	浙江	102	拱 坝	1987
26	碧口	甘肃	101.8	土石坝	1976
27	鲁布革	云贵边界	101	土石坝	1991
28	群英	河南	101	砌石重力拱坝	1971

(董育坚)

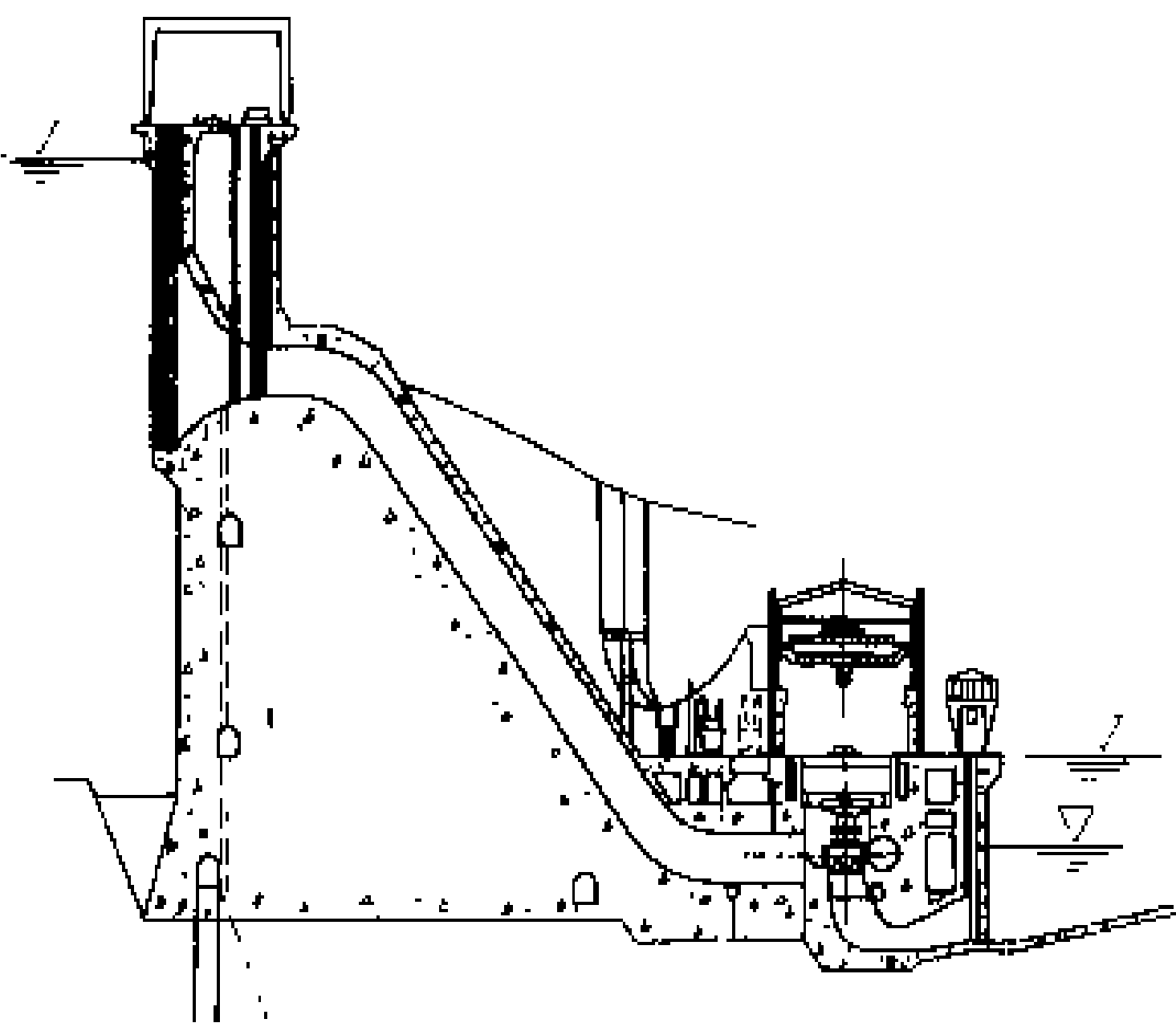
banou beiguan

坝后背管 (penstock on downstream face of the dam) 上部平斜段埋设于混凝土坝内,下斜管段敷设于混凝土坝下游坡上的压力管道。坝外管段由钢管和钢筋混凝土外包层组成,如图所示。也有下游坝面敷设明管,不设钢筋混凝土外包层的。坝后背管较

坝内管可简化大坝混凝土施工,减少对施工的干扰,加快施工进度。背管不削弱坝体断面,受力比较明确。坝后背管对大型混凝土重力坝和拱坝中管道直径相对较大的工程最为适用。坝后背管的总长度有时比坝内管布置稍长,甚至需多设一个弯段。坝后背管抗撞击力较差,受温度作用较大。由于外包层中的钢筋可与钢管联合受力,其造价往往较坝内管低。

由于坝内管段水头较低,多不设弹性垫层。有钢筋混凝土外包层的坝外管段,内水压力由钢管和混凝土外包层中的钢筋共同承担,允许混凝土中产生不大于 0.3 mm 的径向分散裂缝。外界温度变化引起的应力,由外包层中的环向钢筋承担。自重等载荷引起的轴向应力由混凝土、纵向钢筋和钢管管壁共同承担。混凝土外包层与下游坝面之间的切向应力,由沿坝面设置的梯形榫接缝和锚固于坝内的锚筋承担。无混凝土外包层的坝外管各种载荷作用均由钢管承担。

发展简史 坝后背管最早于 20 世纪 60 年代应用于苏联克拉斯诺雅尔斯克水电站混凝土重力坝(坝高 125 m,钢管直径 9.3 m,计算水头 130 m)。其后相继在契尔盖拱坝(坝高 232.5 m,钢管直径 5.5 m)、萨扬-舒申斯克水电站重力拱坝(坝高 236 m,钢管直径 7.5 m)等大型水电站工程中应用。巴西伊泰普水电站双支墩大头坝(坝高 196 m,钢管直径 10.5 m)。中国东江水电站拱坝(坝高 157 m,钢管直径 5.2 m),紧



坝后背管压力管道布置图

ba 坝

水滩水电站拱坝（坝高 102 m，钢管直径 4.5 m）等工程也都采用了坝后背管。苏联、中国的坝后背管均有厚 1.5 m 左右的钢筋混凝土外包层，巴西则只在弯管段设混凝土镇墩，直管段为明管。

（刘维德 王树人）

bahoushi changfang

坝后式厂房（power house at dam toe）

位于拦河坝非溢流坝段下游坝趾的地面厂房。它多适用于混凝土坝（图 1），在中、小型工程中也有用于土石坝的。

厂房内常见机组型式为混流式或轴流式，主厂房通常平行坝轴线呈“一”字形布置，拱坝或重力拱坝的坝后厂房，有的在平面上布置成弧形。电站尾水渠与溢流坝下游水流衔接段之间用导墙隔开，避免泄洪干扰水电站尾水渠水流。有的水电站坝后厂房将机组分成前后双排布置，以缩短厂房长度，称双排机组坝后式厂房（图 2）。有许多水电站的副厂房、主变压器场、开

荷，坝体和厂房各自依靠本身的重力作用以保持稳定。

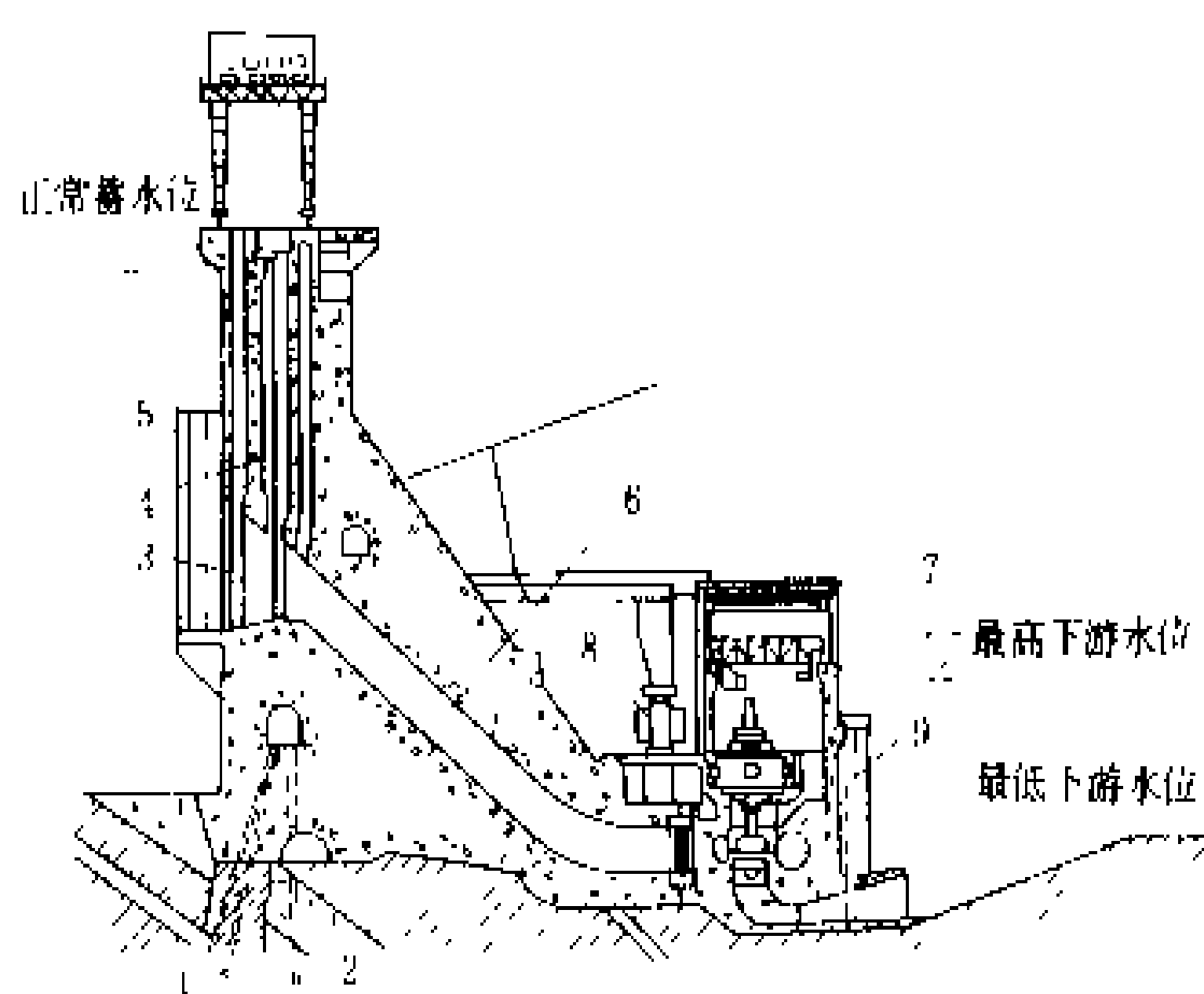


图 1 坝后式厂房剖面图

1—灌浆帷幕；2—排水孔；3—检修闸门门槽；4—工作闸门门槽；5—拦污栅；6—压力管道；7—主厂房；8—主变压器；9—尾水闸门门槽

也有水电站，因下游洪水水位较高，或者基础地质条件较差，为了节约工程量，采取厂、坝联合抵抗水推力，以提高建筑物的抗滑稳定性。

(2) 对于拱坝或重力拱坝，有的如同重力坝厂房紧靠坝趾，有的将厂房向下游移一定距离，以避免厂房基础深开挖对坝基及坝肩的不利影响。

(3) 对于土石坝，厂房多靠近下游坝脚布置，压力引水钢管设在穿过坝体下部的混凝土廊道中，以避免坝体不均匀沉陷的影响并便于检修。

（李必如）

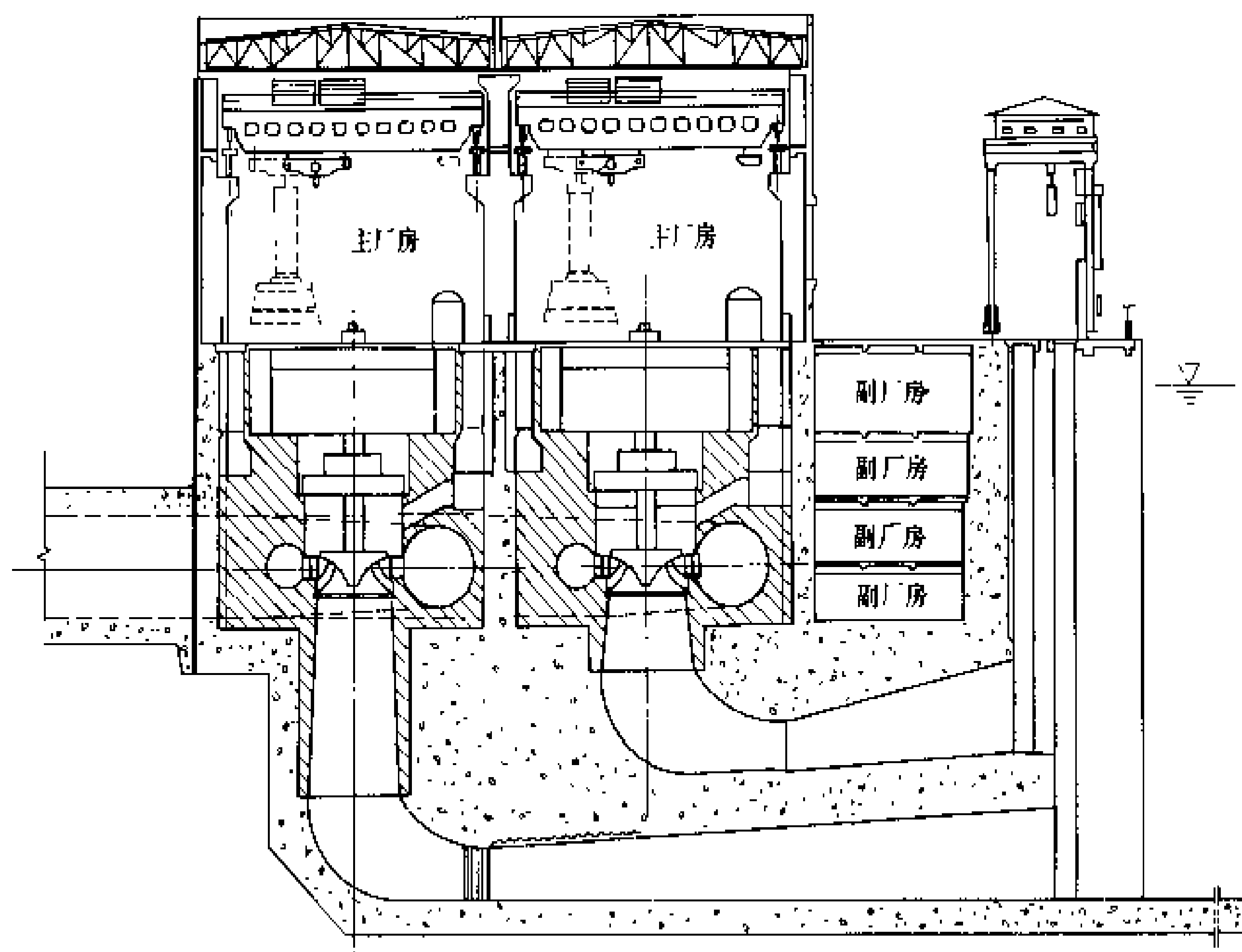


图 2 双排机组坝后式厂房

关站位于厂坝之间，电气接线和运行管理都比较方便。此外，尾水管扩散段的上部和尾水平台、进厂交通线近旁及厂房屋顶等部位也可供布置副厂房、主变压器、开关站等。

厂房与坝连接，视水文、工程地质条件及坝型有下列处理方式。

(1) 对于混凝土重力坝，厂房一般紧靠坝趾，厂、坝之间设有变形缝，使两种建筑物分开，互不传递载

ba 1

坝基（dam foundation） 坝体的地基。它包括河床和两岸放置坝体的部位及其邻近承受坝体及水体等作用力的范围。坝基承受的载荷有：坝基自重、邻近水体重量、淤沙的重量、渗压力、浮托力、地震力和由坝体传来的各种作用力（坝体自重、水压力、泥沙压力、浪压力等）。坝基对各种可能的载荷组合均需满足下列



基本要求：①有足够的强度和刚度，能承受坝体传来的力，不产生不允许的变形和裂隙。②有足够的整体性和均匀性，满足坝基抗滑稳定要求。③有足够的抗渗性，满足渗流稳定性要求。④有足够的抗震稳定性，在地震等动力作用下坝基岩土不产生滑动、沉陷、液化等现象。⑤有足够的耐久性，坝基岩土性能在水的长期作用下不恶化。

当坝基不能满足某些要求时，可对坝基岩土进行处理，使其达到上述要求（见岩基处理和软基处理）。

坝基可分为岩质、非岩质和非均质3种。另外在地质条件复杂的坝址常遇复杂坝基。

岩质坝基 可分为坚岩坝基和软岩坝基。一般坝基岩石抗压强度大于30 MPa为坚岩坝基；小于30 MPa为软岩坝基。坚岩和软岩坝基又均可按岩性分为不同类型。同类岩性的坝基还有风化程度、岩体结构（块状、碎裂、层状）、受地质构造破坏的程度的不同。

非岩质坝基 分为砂砾石坝基、砂质坝基和土质坝基，级配良好的砂砾石坝基具有较高的承载能力，可做高土石坝及坝高40余m以下的混凝土坝的坝基。砂质坝基抗管涌能力弱，承载能力和沉陷性能因颗粒组成、级配、密实度等的不同有很大的变化。均匀的中细砂层遇地震容易液化。土质坝基防渗性能好，内摩擦系数小，沉陷过程长。土质坝基种类繁多，性能相差很

大，因颗粒组成、生成条件等而异。主要有粘土坝基、壤土坝基等。

非均质坝基 不挖除河床覆盖层的岩质坝基、岩性不均一的坝基、具有多种沉积物的非岩质坝基均属此类，其变形、强度、抗渗流等性能往往不均匀，需要在坝和坝基的设计中妥善处理。

复杂坝基 指有重大地质问题，需要进行复杂处理的坝基。岩质复杂坝基有：有缓倾角软弱夹层的坝基、有大的断裂构造的坝基、深覆盖层坝基、有深槽的坝基、喀斯特发育的坝基等。非岩质复杂坝基有：黄土坝基、有细砂层或淤泥透镜体的坝基等。

(1)有缓倾角软弱夹层的坝基。坝基岩体中夹有曾受地质构造破坏，相对软弱的薄岩层，其力学强度低，遇水易软化或泥化，连续性强，倾角小于30°。这种软弱夹层对坝基稳定最为不利。软弱夹层埋藏于地下，其分布和性状很不易查清，需根据勘探资料和地质背景、生成条件等加以综合分析判定。影响软弱夹层抗剪强度的因素主要有夹层界面中的软弱物质、界面的状态（糙度、起伏度）等。根据所夹物质性状，软弱夹层可分为粘泥型、泥含粉粒碎屑型、碎屑夹泥型、碎屑型等类型，一般含泥多的界面光滑，起伏度小的软弱夹层抗剪强度最低。

(2)深覆盖层坝基。有的坝基覆盖层深度超过百

岩 质 坝 基 按 岩 性 分 类 表

坝 基 岩 石 类 型			代 表 岩 石	一 般 特 征
坚 岩 坝 基	岩 浆 岩 坝 基	深成岩坝基	花岗岩、闪长岩、正长岩、辉长岩、橄榄岩等	块状结构，强度高，抗水性好，岩质坚硬
		浅成岩坝基	花岗斑岩、正长斑岩、闪长玢岩、辉绿玢岩	块状结构，强度较高，抗水性较好，岩质较坚硬
		喷发岩坝基	流纹岩、安山岩、粗面岩、辉绿岩、玄武岩	块状或层状结构，常有气孔和岩浆冷却形成的节理，一般强度及抗水性均较好
	沉 积 岩 坝 基	沉积碎屑岩坝基	砂岩、粉砂岩、砾岩	层状结构，因胶结物成分不同强度变化很大，抗水性较好
		火山碎屑岩坝基	集块岩、火山角砾岩、熔凝灰岩	块状或层状结构，一般强度中等到较高，抗水性较好
		化学岩及生物化学岩坝基	灰岩、白云岩	多力层状结构，强度中等到较高，抗水性差，常有溶蚀
	变 质 岩 坝 基	深变质岩坝基	片麻岩、结晶片岩	块状及片状结构，强度高，抗水性好
		浅变质岩坝基	石英岩、板岩、片岩	块状及片状结构，强度较高，抗水性好
		热力变质岩坝基	大理岩、硅质灰岩	块状或层状结构，强度较高，溶蚀性弱
软 岩 坝 基	泥质岩坝基		页岩、泥质胶结的砂岩、粘土岩、泥灰岩	层状结构，强度低，遇水易软化
	变质岩坝基		千枚岩、云母片岩、绿泥石片岩	层状结构，强度低，遇水易软化
	火山碎屑岩坝基		凝灰岩、凝灰质页岩	强度低，遇水易软化

米，著名的有巴基斯坦塔贝拉（Tarbela）坝基、加拿大马尼克-3（Manic-3）坝基。这种坝基只能修建土石坝和低的混凝土坝，需采取复杂的防渗措施。

（3）有深槽的坝基。坝基岩体中有窄而深的槽，充填软弱物质，需要清除或处理，例如中国铜街子水电站玄武岩坝基中有深达 70 余 m 的深槽。

（4）喀斯特发育的坝基。喀斯特主要发育在灰岩中，查清其分布规律一般需进行大量勘探工作。防渗处理不好，可能大量漏水。中国乌江渡重力拱坝，坝高 165 m，两岸喀斯特及暗河发育，坝肩附近洞穴回填混凝土总体积达 8 万多 m³，左岸部分地段沿断层发育的溶洞深达河床以下 200 m，用高压灌浆等措施进行大量复杂的处理，得到成功。

（5）有大断裂构造的坝基。例如河床和岸坡有顺河断层、横河及斜交断层，甚至活动性断层，对坝基的稳定、变形、防渗等都有极大影响。

（6）黄土坝基。黄土属大孔隙土，含大量水溶盐，遇水丧失强度，产生大量沉陷。黄土成因复杂，其湿陷性有显著差异，对这种坝基要仔细研究处理。

（7）有细砂层或淤泥透镜体的坝基。细砂层有可能液化，淤泥密度小，沉陷量大，都需仔细研究处理。

（董育坚）

baji wending

坝基稳定 (stability of dam foundation)

坝基在各种载荷作用下不产生滑动、过大变形和渗流等破坏的性能。坝基需满足抗滑稳定、变形稳定、渗流稳定和抗震稳定等。对多数坝基抗滑稳定尤为重要。坝基稳定是保证坝的安全和正常运行的基本条件。

抗滑稳定 分为岩质坝基抗滑稳定和非岩质抗滑稳定两种类型。

岩质坝基抗滑稳定 岩质坝基滑动失稳多由于坝基岩体中存在产状不利、抗剪强度较低、比较连续的结构面，特别是软弱夹层最为不利。在各种载荷作用下，

面、切割面、临空面和下游阻滑面组成（图 1）。滑动面多为埋藏不深，连续性强、倾角小于 30°的软弱结构面。它是控制坝基滑动稳定的主要因素。切割面有上游切割面和侧切割面，多由横河和顺河发育的陡倾断裂面构成。临空面是滑动岩体出露的地表面，有时滑动岩体下游存在压缩性很大的陡倾断层，也常被视为临空面。滑动面倾向下游，滑动时能起支撑作用的岩体为下游抗力体。抗力体的底面为下游阻滑面。

滑动失稳的型式可分为深层滑动、浅层滑动和混合型滑动 3 种。深层滑动失稳是岩体沿深部滑动面滑动破坏，有单面滑动（图 2）、折面滑动〔图 1（a）〕等型式。浅层滑动失稳是由于浅层岩体软弱、风化层未彻底挖除，沿坝基浅部滑动。混合型滑动失稳是部分沿坝体或坝体与岩体接触面滑动，部分在岩体内部滑动（图 3）。

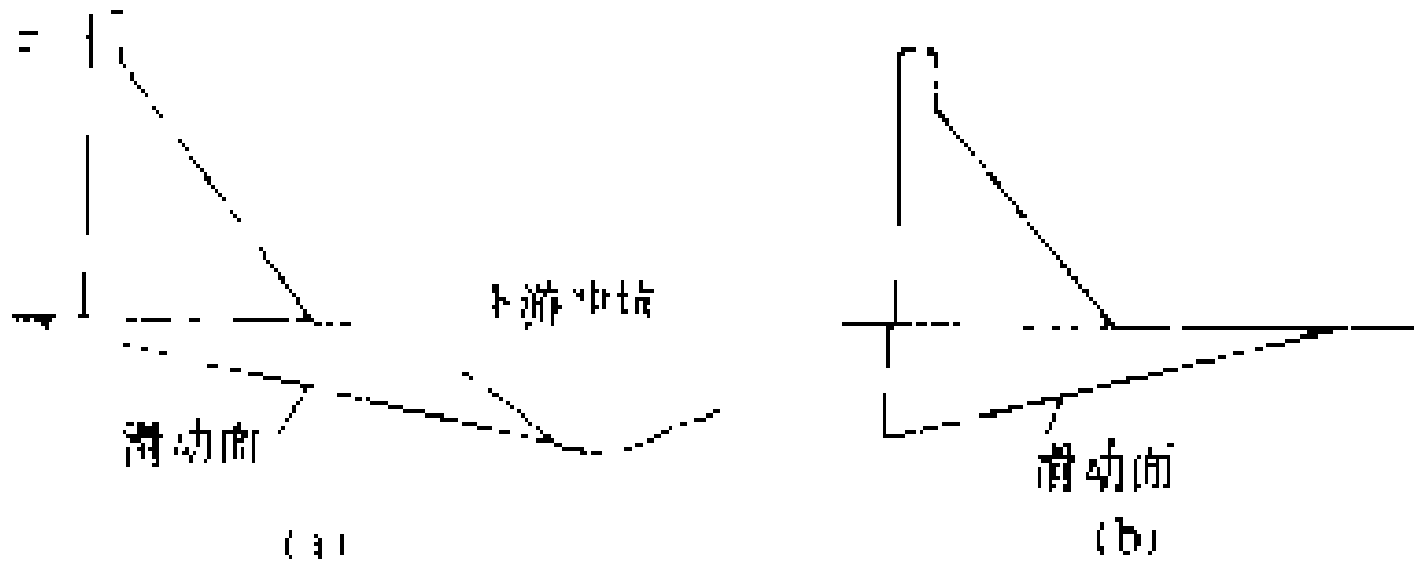


图 2 单面滑动示意图

（a）滑动面倾向下游；（b）滑动面倾向上游

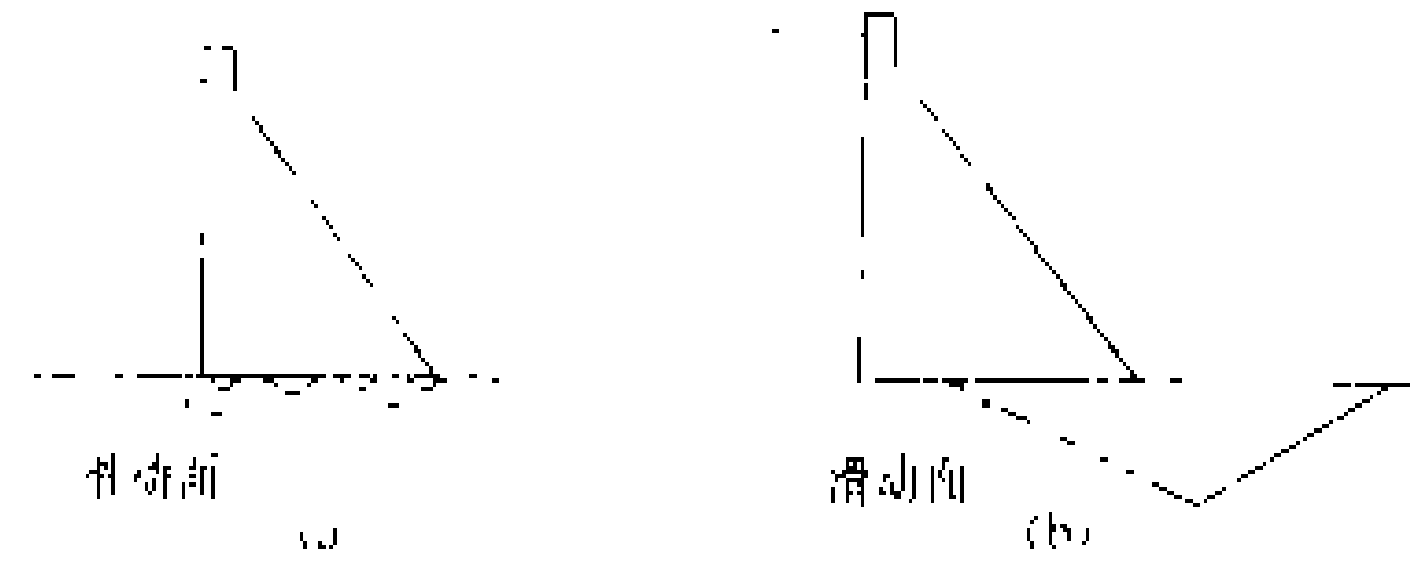


图 3 浅层滑动和混合型滑动示意图

（a）浅层滑动；（b）混合型滑动

岩质坝基的抗滑稳定分析，首先根据勘测、试验资料，并参考类似工程经验，经分析判断找出可能的滑动边界，合理确定滑动边界上的抗滑参数（摩擦系数 f 和粘着力 c ）。在此基础上进行分析计算或模型试验，求出抗滑安全系数 K （抗滑力与滑动力之比），用以判定坝基的抗滑稳定性。分析计算方法可采用刚体极限平衡法或有限元法。地质条件复杂的重要工程可用地质力学模型试验验证。刚体极限平衡法将滑动边界内岩体视为刚体，只考虑它所受合成力的平衡，而不考虑力矩和变形作用。各国设计规范多以刚体极限平衡法为主要计算方法，并规定相应的抗滑参数取值和安全系数标准。刚体极限平衡法的计算公式见重力坝。

非岩质坝基抗滑稳定 除坝基内存在沿该面产生滑动抗滑软弱面外，滑动多沿抗滑能力最弱的滑弧发

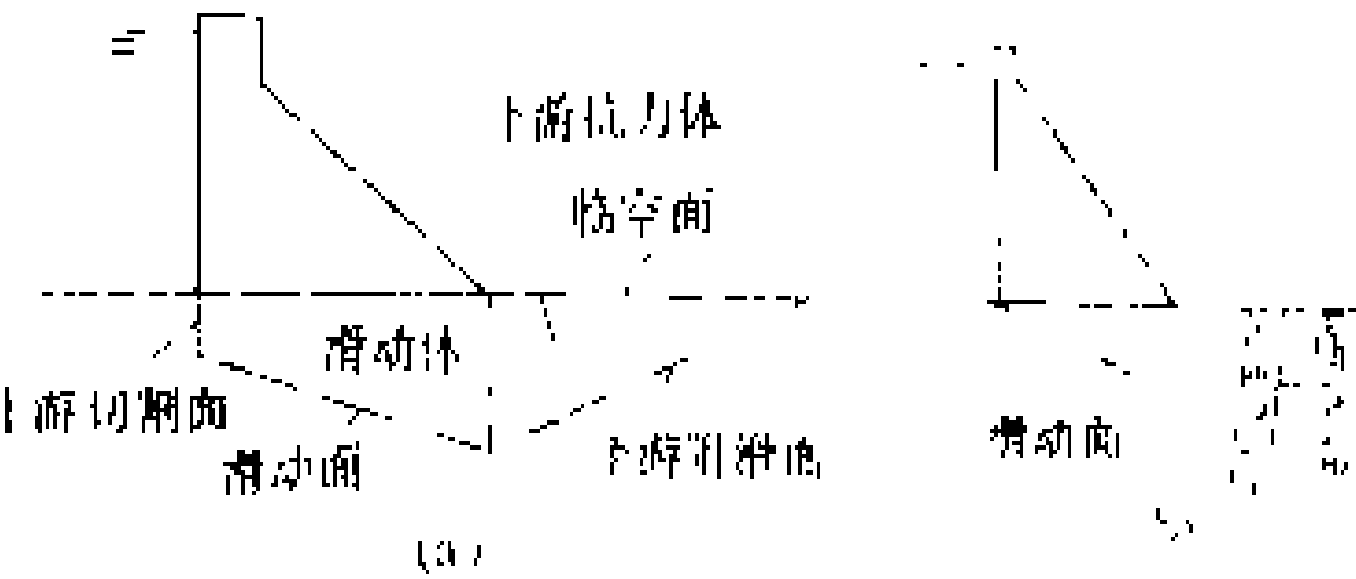


图 1 滑动边界示意图

（a）折面滑动；（b）有压缩性大的临空面的滑动

坝基岩体沿不利结构面及岩体抗剪能力最低的路径在临空面出露，形成滑动边界。当滑动边界上的滑动力大于阻滑力时，坝基即滑动失稳。滑动边界一般由滑动

生。分析计算方法一般采用刚体极限平衡法。当无抗滑软弱面时可采用圆弧法，存在软弱面时采用折线法。

变形稳定 过大的或很不均匀的变形可导致坝基变形失稳。在岩质坝基中多由于存在大的断层破碎带，在非岩质坝基中多由于有压缩性大的土层。在载荷作用下，坝基变形与载荷呈线性关系时，一般坝基处于稳定状态。

渗流稳定 渗流可导致管涌和流土，使坝基渗流失稳。在非岩质坝基中，管涌是土的细小颗粒被渗流冲走，形成管状渗流通道，甚至掏空部分坝基现象。流土是坝基部分土体被渗流抬动，使坝基丧失承载能力现象。在岩质坝基中，断裂构造中的软弱物质被渗流冲刷可能导致管涌。管涌容易在不均匀系数大的非粘性土中发生。当渗流的水力坡降大于土体的管涌临界水力坡降时即产生管涌。管涌临界水力坡降由试验确定。防止管涌破坏，除降低渗流的水力坡降外，主要靠做好渗流出口处的反滤。流土多发生在颗粒级配均匀和颗粒较细的砂性土中，但如设计、施工不当，粘性土中有时也发生流土。产生流土的条件是土体渗透性小，排水不畅，水力坡降较大，渗透压力超过土体重量。

抗震稳定 丧失抗震稳定主要有下列 2 种情况。

(1) 坝基受地震作用孔隙水压力增大，有效压力减小，抗滑强度降低，使坝基滑动失稳。坝基中粘性土或粘性土夹层含水量高、排水不畅时容易发生这种情况。

(2) 地震时坝基土体液化，使坝基完全丧失强度。一般颗粒较细、级配均匀的疏松砂土容易产生液化。中值粒径 0.02~0.5 mm、不均匀系数 2~10、粘粒含量小于 17%、塑性指数小于 14 的土属液化土。灵敏度高的粘性土及淤泥也容易产生液化。

(董育坚)

ba'neiguan

坝内管 (penstock buried in dam) 埋设于混凝土坝体内的压力管道。管道多设钢板衬砌。钢管与坝体混凝土间可设和不设弹性垫层。管内最大流速一般为 5~7 m/s。混凝土重力坝或重力拱坝的坝后式厂房、溢流式厂房和坝内式厂房多采用这种型式。

布置型式 立面布置有斜式和平式两种型式。斜式布置管轴线与坝下游坡面近似平行。其特点是：①进水口高程较高；大部分管段内水压力较小。②管轴线和坝体内较大的主应力轨迹线近于平行，管道外围混凝土孔口应力较小。③进口闸门启门力小，闸门及启闭设备的造价较低，运行也较方便。④弯道较多，管道较长。后者如图 1 虚线所示，管道较短，弯道较少，能减少水头损失，但由于进口高程较低，坝体孔口受力较差，施

工时干扰也大。进水口、闸门及启闭设备投资大，管理操作不够方便。此种布置多用于混凝土拱坝或较低的重力坝。

坝内管的平面布置有斜向和直向两种型式。当大坝与厂房的横缝设于同一直线上，坝内管在平面上则需斜向布置进入厂房，如图 2 (a) 所示。直向布置的坝内管在坝段中

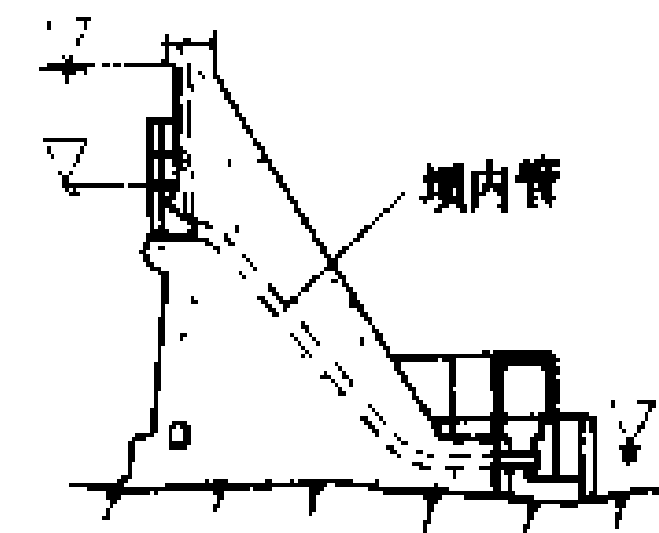


图 1 坝内管的立面布置方式

央进入厂房，大坝与厂房的横缝不是布置在同一条直线上，而是相互错开的，大坝与厂房间要设纵缝，如图 2 (b) 所示。

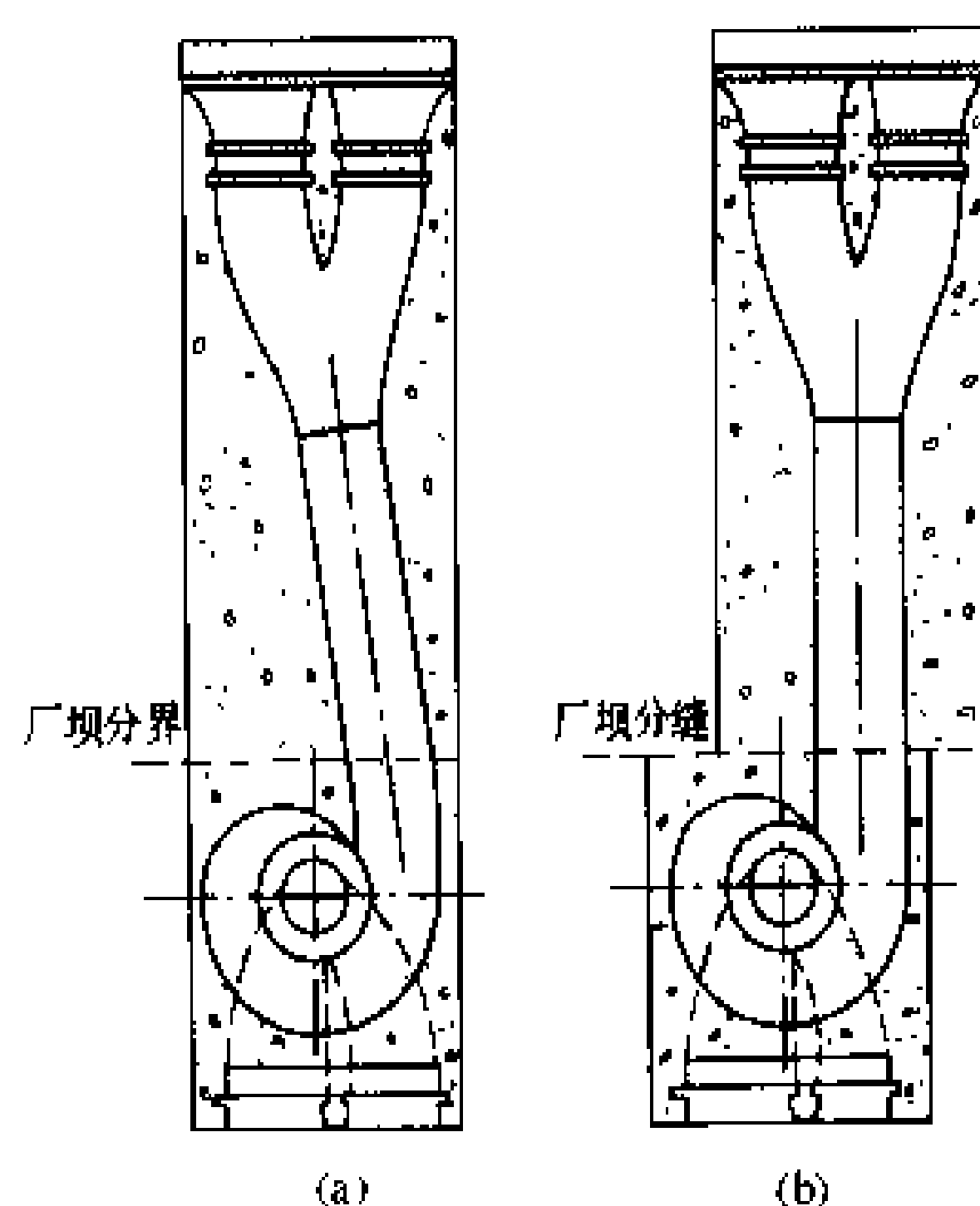


图 2 坝内管的平面布置方式
(a) 斜向布置；(b) 直向布置

结构计算 包括管道周围钢筋混凝土结构计算和钢管结构计算。钢管与混凝土间设弹性垫层时，钢管承担全部内水压力，钢管周围混凝土按大坝孔口应力配筋；钢管与周围的混凝土浇筑在一起。不设弹性垫层时，钢管仍按承担全部内水压力设计，将钢管允许应力适当提高，常取屈服强度和 2/3 极限强度二者中的较小者为允许应力进行计算。钢管周围混凝土按承受部分内水压力的孔口应力配筋，并需做好回填灌浆，保证钢板与外围混凝土接触密实。钢管计算包括：①内水压力作用下的钢板厚度计算；②外水压力、浇筑混凝土及灌浆等外压作用下的钢管外压稳定计算。

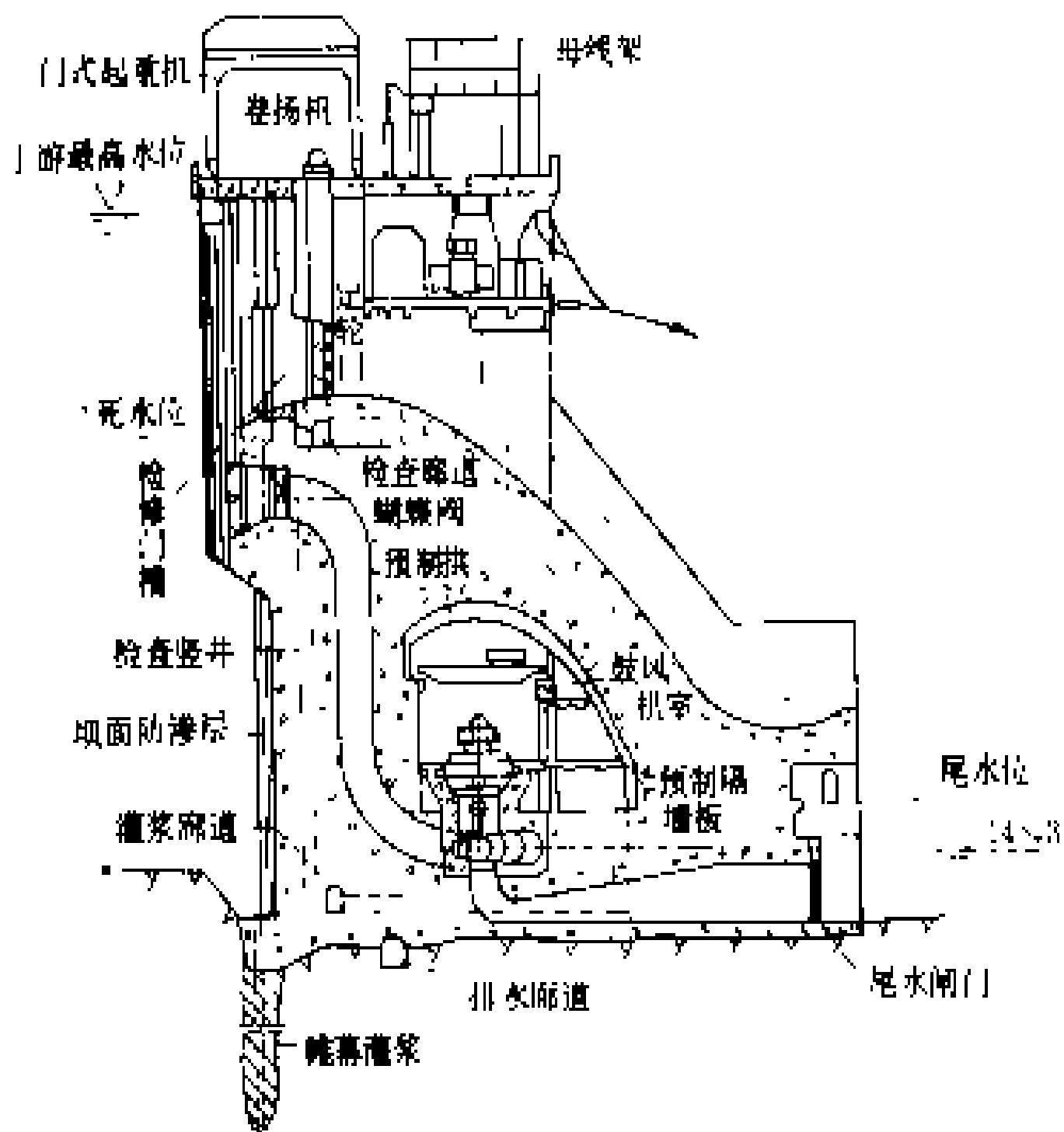
(刘维德 王树人)

ba'neishi changfang

坝内式厂房 (power house within the dam)

设在混凝土坝空腔内的水电站厂房。当河谷狭窄，下泄洪水流量大，坝内式厂房有时是可采用的方案

(见图)。50 年代建成的上犹江水电站厂房是中国最早的坝内式厂房。这种厂房的布置和运行条件均有其特点。



坝内式厂房横剖面图

布置 坝体内空腔的形状及尺寸与坝体设计关系密切,除满足机组及附属设备布置外,还必须适应坝体强度和稳定条件,采用优化断面(见空腹坝)。

坝内式厂房常设于溢流坝坝段内,机组进水口多设在溢流坝闸墩内,闸墩宽度较大,可避免进水口的拦污栅、工作闸门、检修闸门与溢洪道布置上的干扰;另一种布置,将机组进水口设在溢洪道下面,上下重叠,进水口闸门布置较复杂。当厂房布置在非溢流坝坝体内,其机组进水口布置类似坝后式厂房。

压力引水钢管埋置在坝体中,长度较短,水头损失小。水流从水轮机转轮泄出,经较长的肘形尾水管泄入尾水渠。尾水管水平段需穿过坝体后腿,为使后腿的孔洞周围应力不超过允许限度,尾水管水平段断面采用窄高型。尾水管出口位于溢流坝挑流鼻坎下,或非溢流坝下游坝趾处,通常设有尾水闸门和启闭机械。

坝体内空腔高度受坝高限制,厂房内部布置比较紧凑。主机间和安装间的地面高程主要由水轮机安装高程和机组尺寸所决定,往往低于下游最高洪水位。对外交通运输一般采用隧洞或廊道,其入口需高于下游最高洪水位,以免洪水倒灌进厂房。有的水电站入口低于下游最高洪水位,但采取了设置防洪堤(墙)、挡水门和备用通道等防洪措施。

中央控制室、厂用配电室常布置于坝体空腔的下游侧部分。发电机出线经廊道或竖井引出。辅助生产副厂房多布置于坝内厂房外面邻近地方。主变压器场和开关站可因地制宜布置,有的利用其他坝段空腔,有的设在坝顶。

运行条件 类似地下式厂房,防潮、通风、防噪声等问题比较突出,要妥善处理。为了减少潮湿来源,需提高坝体混凝土密实性,空腔边壁设置防潮隔墙和顶棚,加强空气调节。另外要提高设备质量,减少振源和噪声强度,采取隔离措施以减少传播。设备布置及建筑物构造都要满足防火、防爆规定,并需有安全出口。泄洪时由于射流作用,可使尾水管出口水位低于下游洪水位,增加一些水头,同时随水流所夹带的漂浮物也可借泄流排入下游河道,减少机组进水口拦污栅堵塞的机会。下游岸坡防护及泄洪时水流雾化影响如同溢流式厂房。

(李必如)

baqu nisha yuji

坝区泥沙淤积 (sedimentation in dam area)

在河流上筑坝壅水后,由于壅水区内水深加大,流速降低,会造成坝前泥沙的淤积。坝区泥沙淤积产生的问题主要有:①在船闸引航道中及其口门附近产生淤积,使航深不足或水流不顺而有碍通航。②电站进水口前的泥沙堆积使过机水流中的泥沙变粗,含沙量增大,造成过水建筑物或水轮机过流部件的严重磨损。③坝前泥沙淤积有可能影响闸门启闭,堵塞泄水孔,影响大坝安全。

以通航为主的枢纽和以发电为主的枢纽对坝区水流条件的要求不同,防治坝区泥沙淤积的措施也不一样。

(1)以通航为主的枢纽。宜将船闸布置在靠近稳定深泓线一侧,要避开弯道的凸岸和回流、缓流区。这些地区都是泥沙集中淤积处,且淤积后又难于冲走。结合各个工程的实际情况,可设置某些导流排沙工程,如修建引航导墙以破除回流减少淤积;设置底部高程较低的冲沙闸,以定期冲刷上游及下游引航道淤沙。

(2)以发电为主的枢纽。高水头水电站的防沙措施主要是设置高程较低的排沙孔。排沙孔布置在机组进水口的下面,防沙效果最好,但结构复杂,施工及管理都不便。一般把排沙孔设在进水口的侧下方,其位置以使进水口处在冲刷漏斗的影响范围之内为原则。低水头枢纽的防沙措施,主要是进行合理的平面布置。如利用弯道环流特性,正面取水,侧面排沙,同时设置导沙坎,常能取得较好的防沙效果。在中小型水库中,也可采取清浑水分治的办法,即在壅水区上游修建排浑渠(或排浑洞),当汛期洪水入库时,可将浑水通过排浑渠(洞)直接排往坝下游,减少主库淤积,缓解坝区泥沙问题。

(姜乃森)

bashen xieshuikong

坝身泄水孔 (outlet in dambody) 通过混凝土坝或砌石坝坝身孔口过流的泄水建筑物。它在枢纽中的作用和泄洪隧洞相似,可用作中孔或深孔,在水库高、低水位时均能泄水,有利于水库排沙和防止电厂取水口前泥沙淤积,并在紧急情况下用来放空水库。汛期也可泄洪,有的还参与施工后期(导流洞下闸封堵之后)导流。坝身泄水孔一般由控制段、过流段和消能建筑物组成,见图1。

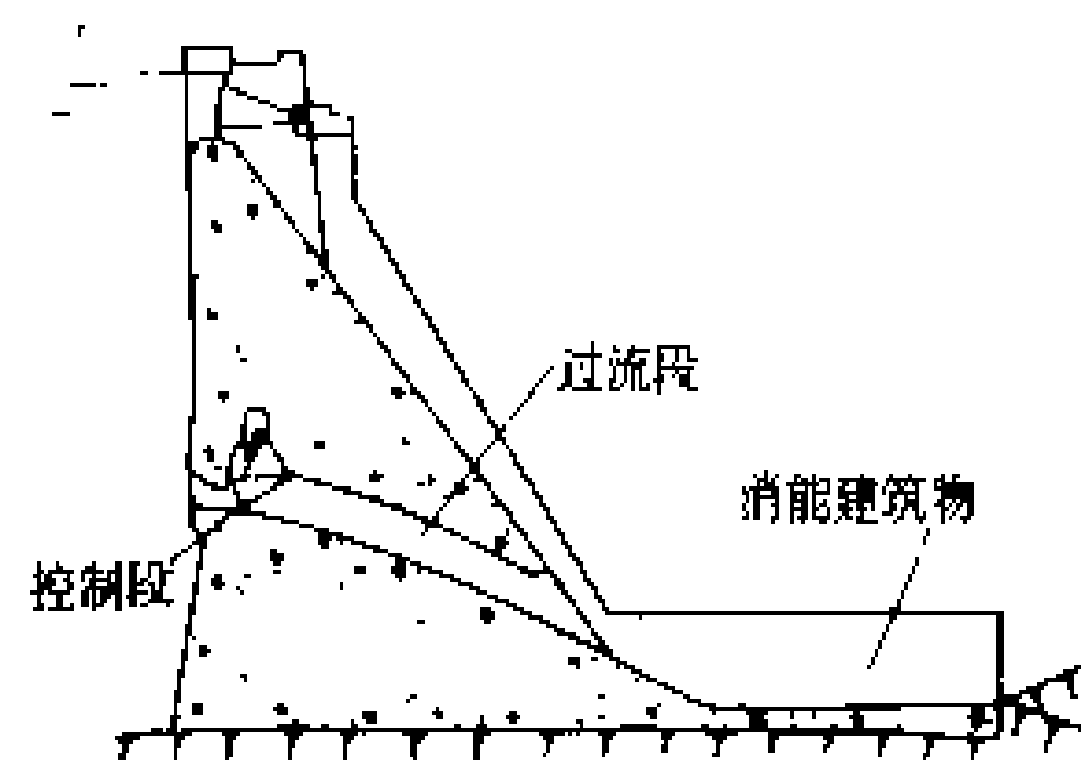


图1 坝身泄水孔布置

按水力学条件,坝身泄水孔可分为有压和无压两种。有压泄水孔的控制段布置在坝下游面出口处,设有工作闸门及启闭机以控制泄流,检修闸门布置在上游进口。这种泄水孔的轴线在平面上可不要求为直线,但洞内流速和弯道曲率不宜过大。无压泄水孔的控制段布置在坝体上游面,闸后为无压水流,孔口内水面以上应留有净空并设通气孔补气,线路尽量顺直以维持流态稳定。

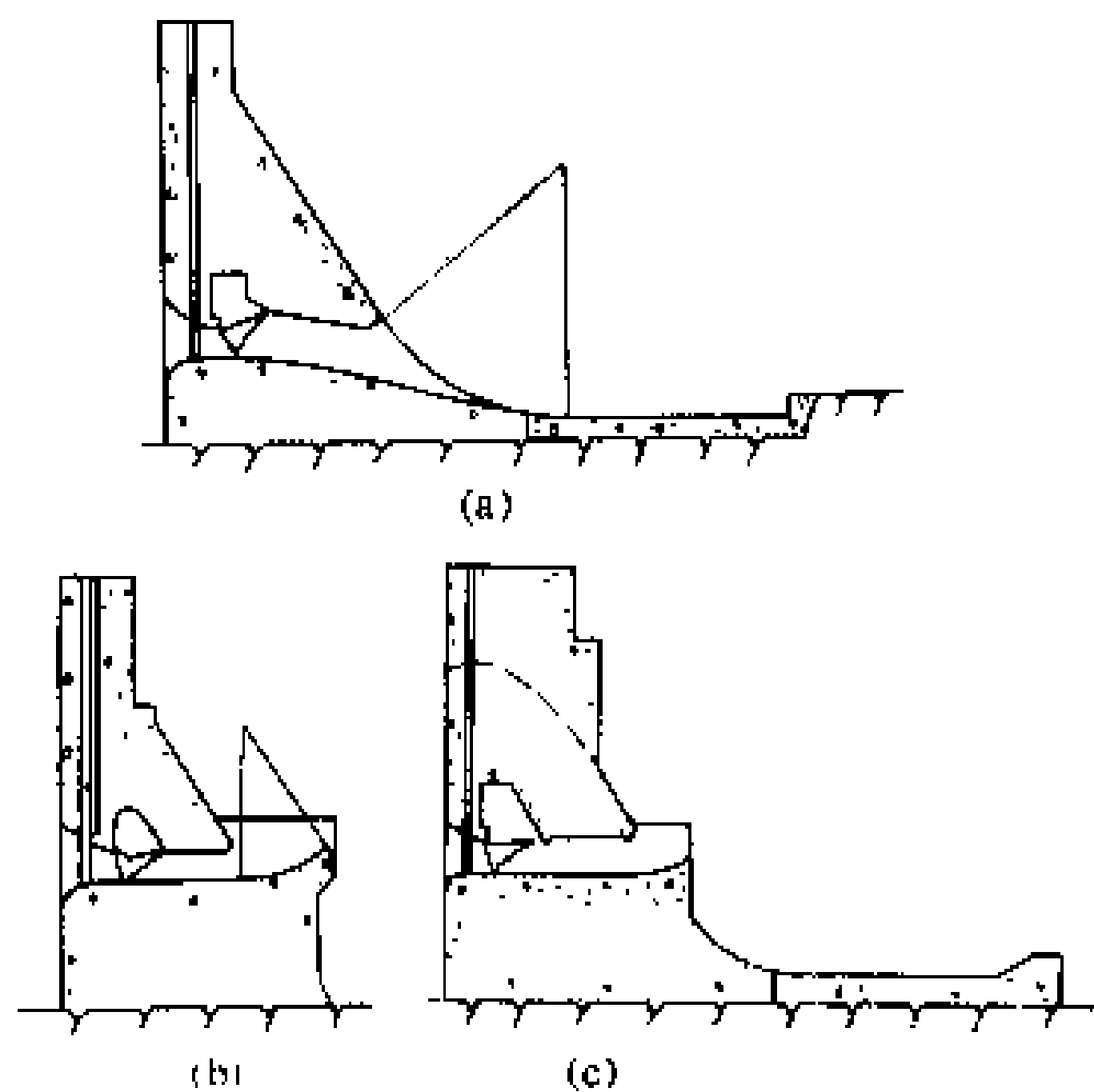


图2 坝身泄水孔消能建筑物布置

(a) 底流消能; (b) 挑流消能; (c) 挑流与底流相结合消能

坝身泄水孔在坝体内开孔,削弱了坝体结构,同时孔内为压力水流时,孔壁将承受内水压力。在坝体应力、内水压力及温度应力的作用下,孔口边缘将出现应力集中现象,需按应力分布,在孔口周边配置钢筋予以

加强,或用钢板镶护,对有压孔口宜采用圆形断面以改善孔口应力条件。

坝身泄水孔可以采用底流水跃消能,也可采用挑流消能,其挑流鼻坎可采用和溢流表孔鼻坎不同的高程和挑角,以便使水舌在空中相互碰撞消能,减轻河床冲刷。当溢流表孔采用消力池消能时,可令坝身泄水孔的挑流水体落入消力池内形成挑流与底流相结合的消能方式。坝身泄水孔的消能建筑物布置见图2。

(林可冀)

bashi jinshuikou

坝式进水口 (dam intake) 位于混凝土坝坝体中的深式进水口。坝式进水口见图1所示,在喇叭口前,靠近上游坝面布置拦污栅,支承在喇叭口的底坎上。一般在喇叭口的下方和两侧,从坝面挑出支承拦污栅的悬臂和框架结构。常在平面上将拦污栅按折线向上游凸出布置,以增大过流面积,降低过栅流速。也有的水电站在所有机组的进水口前通仓布置拦污栅,既增大过流面积,又能在拦污栅局部堵塞时不影响各进水口引水发电。

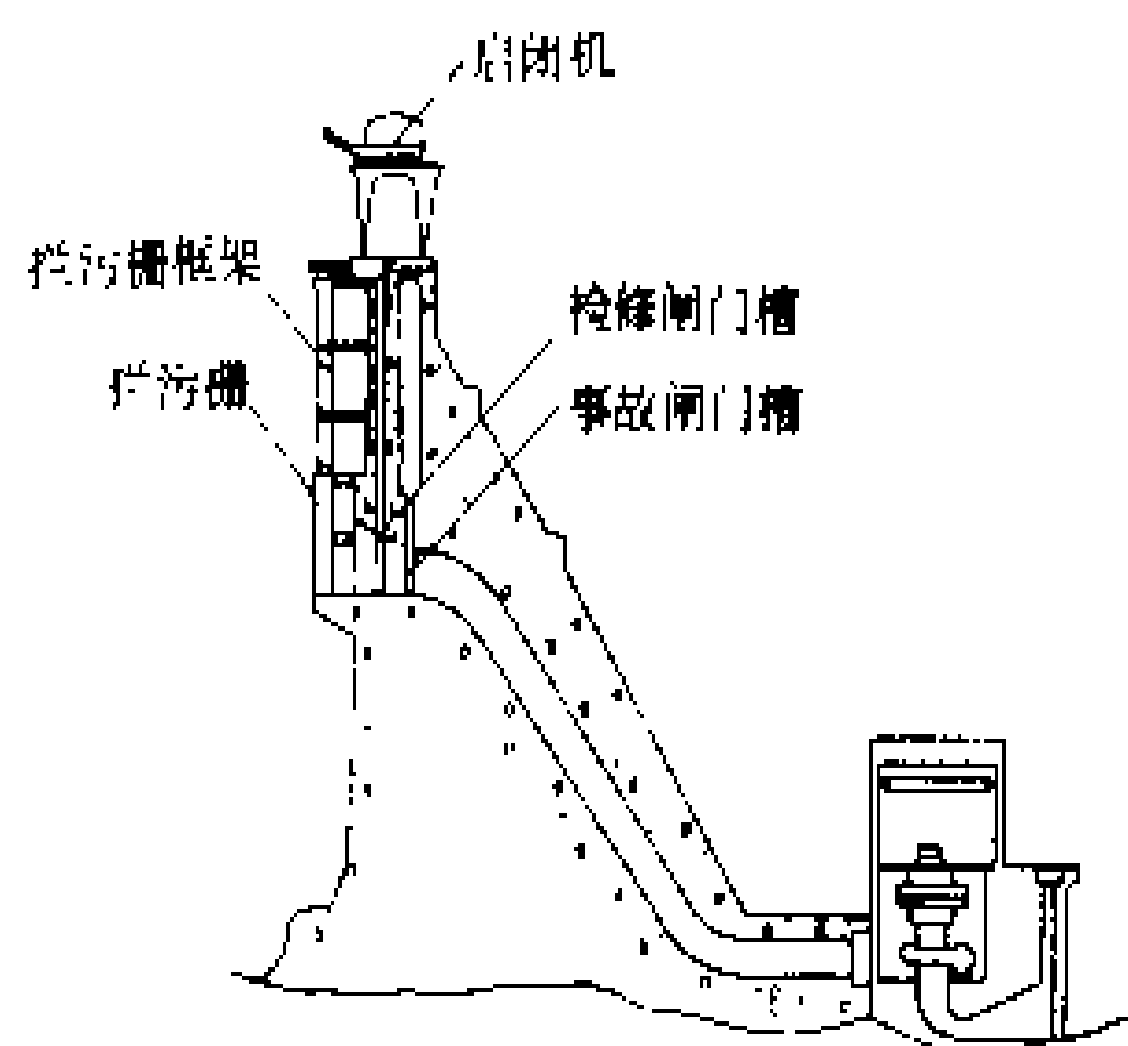


图1 坝式进水口

检修闸门和事故闸门多布置在喇叭口的下游端,以隔墙分开。启闭机与清污机装置在坝顶上。有时将检修闸门与拦污栅同槽布置。

坝式进水口利用坝体前缘,不另建专门的进水口

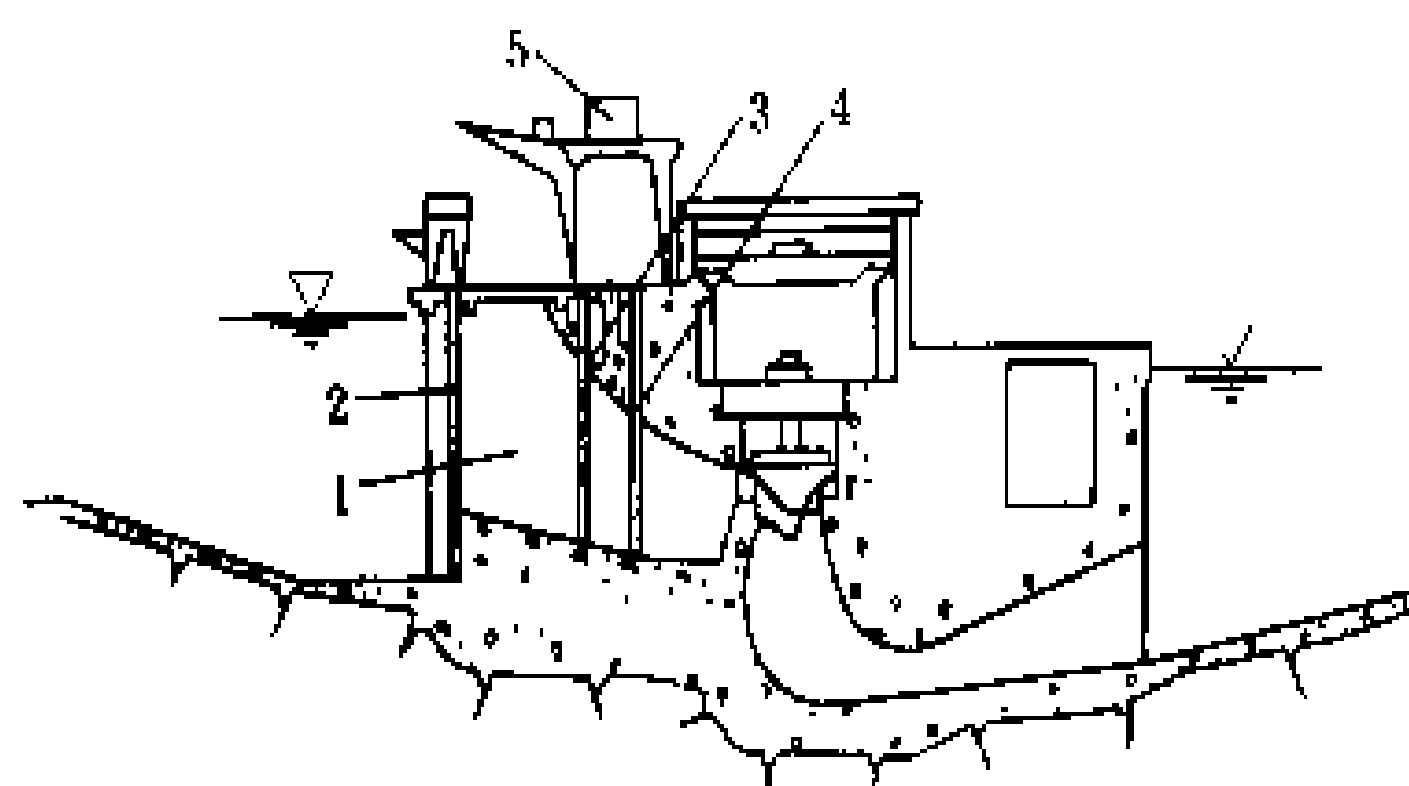


图2 河床式水电站进水口

1 喇叭口; 2 拦污栅; 3 检修闸门槽; 4 事故闸门槽; 5 启闭机

ba 坝

建筑物,虽对坝体应力有不利影响,对大坝施工有一定干扰,但布置紧凑,比较经济合理。坝式进水口多用于坝后式厂房。

河床式水电厂的厂房本身又是壅水建筑物,其进水口是厂房建筑物的组成部分,故可将其看成是坝式进水口的一种特殊型式。河床式水电站水头低,引用流量大,需要较大的孔口,水流经喇叭口直接进入水轮机房,见图2所示。

河床式水电站壅水高度有限,进水口以上淹没深度小,其底板高出河底不多,在防沙、防污和防冰问题上类同开敞式进水口。

(丁志华)

oashi shuidianzhan

坝式水电站 (dam type hydropower station)

由河道上的挡水建筑物壅高水位而集中发电水头的水电站。坝式水电站由挡水建筑物、泄水建筑物、压力管道、厂房及机电设备等组成。由坝作挡水建筑物时多为中高水头水电站。由闸作挡水建筑物时多为低水头水电站。当水头不高且河道较宽阔时,可用厂房作为挡水建筑物的一部分,这类水电站又称河床式水电站,也属坝式水电站。

坝式水电站和引水式水电站是水电开发的两种基本方式。坝式水电站适宜建在河道坡降较缓且流量较大的河段。由挡水建筑物形成的水库常可调节径流,其调节能力取决于调节库容与入库径流比值的大小(见径流调节)。不少坝式水电站具有多年调节和年调节的水库,也有的坝式水电站水库容积很小,只能进行日调节甚至不能调节径流。不调节径流的水电站称为径流式水电站。

坝式水电站具有以下特点:①具有日调节以上性能时,适宜担任电力系统的调峰、调频和备用任务,可增大电站的电力效益和提高供电质量。②枢纽布置集中,便于运行管理。③不会像引水式水电站那样要出现脱水河段,相反其库区可增加河道水深,有利于通航。④对调节性能好的水电站,库水位变幅较大,低水位时减少了利用水头,有时会影响通航,在水轮机选择时要考虑低水头的影响。⑤水库淹没损失大。

坝式水电站按厂房与坝的相对位置可分为:①坝后式。厂房在坝后,压力管道通过坝体,如中国的刘家峡水电站。②坝内式。压力管道和厂房都在坝内,如中国的风滩水电站。③厂房顶溢流式。厂房在溢流坝后,泄洪水流从厂房顶部越过,也有利用厂房顶作为泄洪道的底坎的,如厂坝连接采用下部结构完全脱开、厂房顶板为钢筋混凝土拉板简支在坝体的新安江水电站。④岸边式。厂房设在下游岸边,引水道在坝

侧地下,如中国的白山水电站(二期)。⑤地下式。引水道和厂房都在坝侧地下,如中国的白山水电站(一期)。⑥河床式。厂房本身是挡水建筑的一部分,如中国的大化水电站。

(欧阳华)

oaxian

坝线 (dam axis) 坝顶上游边线或中心线,也称坝轴线。它是坝位置的基准线,可作为布设勘探网、进行坝和水电枢纽布置设计的参考线、以及施工放样的基准线。各类混凝土坝多以坝顶上游边线为坝线;土石坝则以坝顶中心线为坝线。坝线可为直线、折线或曲线,但不宜出现一部分突出于另一部分的突变点。坝线位置要尽量使枢纽主要建筑物避开坝址内的重大地质缺陷,布置在地质、地形条件适于建坝和其它主要水工建筑物的地方。水电枢纽总工程量、坝基和两岸接头以及坝基防渗的条件是选择坝线的重要因素。单薄山脊对坝肩防渗不利,一般不宜作为高坝的坝线位置。河湾地段形成的河间地块,对布置土石坝枢纽的泄洪、导流建筑物有利,当地质条件允许时,常可作为土石坝枢纽的坝线位置。在峡谷、丘陵区坝址泄洪、导流以及地下建筑物的布置条件也是选择坝线位置的重要因素。在平原坝址,使水电枢纽总工程量最小常是重要因素。一般在选定的坝址内,通过对几条可能坝线的技术经济比较确定坝线。

(董育坚)

baxing xuanze

坝型选择 (selection of dam type) 确定坝型的论证工作。它是水利、水电枢纽工程设计的重要决策项目。采用的坝型是否恰当对工程的安全、经济以及施工、运行等均有很大的影响。不同坝型各有其特点及适用条件。影响坝型选择的因素有:坝址的地形、地质、水文、气象、地震烈度、当地建筑材料等自然条件和枢纽布置、导流、对外交通、施工组织、工期、坝的运行条件等。坝型选择一般与坝址和枢纽布置结合进行,在多方案的技术经济综合比较的基础上选定。通常坝型选择分阶段进行,先选出基本坝型(混凝土坝或土石坝),进一步深入工作后,再从基本坝型中选出采用的坝型。各种坝型的特点及适用条件如下。

(1)土石坝。利用土石材料筑坝,可以节省水泥,减少外来物资的运输量;对坝基工程地质条件要求较低;但不能利用坝身过水。这种坝型适用于岸边容易布置泄洪、导流及引水发电等建筑物的坝址,有合适的土石筑坝材料,对外交通不便,外来材料运输费高,近坝库岸无大的滑坡涌浪的威胁等条件。土石坝中,堆石坝

特别是混凝土面板堆石坝,坝坡较陡,枢纽泄洪、导流、引水等建筑物的长度也相应较短,并可以利用枢纽工程开挖的石料筑坝,施工受雨季和寒冷的气候影响较少,施工速度较快,坝体抗渗流管涌的能力较强,是一种经济、安全的坝型。但这类坝型对坝基的要求较高,一般要求坝基岩石的抗剪能力和压缩性能满足稳定和变形的要求,不控制坝坡坡度,必要时需将软弱覆盖层挖除。级配良好的砂砾料坝具有与堆石坝类似的优点,坝坡也较陡,可以利用天然砂砾料,对坝基要求较堆石坝低。均质土坝一般为较低的坝,坝坡缓,抗管涌能力低,施工常受雨季及低温季节的控制,施工进度较慢。

(2)混凝土坝。除挡水外,坝体还可用来布置泄洪、导流、引水建筑物,有时还可在坝体内设置发电厂房,因而可充分利用河床布置枢纽建筑物,抗超标准洪水的能力强,有较高的安全性。混凝土重力坝坝体混凝土量大,耗用水泥较多,适用于在宽河谷坝址修溢流坝,在洪水流量大的峡谷坝址也常用作挡水坝或溢流坝。较高重力坝需建在岩基上,坝高40 m以下重力坝有可能建在非岩基上。非岩基上的重力坝只有作为溢流坝才是经济合理的。混凝土拱坝较重力坝可节省坝体工程量20%~70%。它要求两岸拱座岩体稳定性好,能够支撑拱坝传来的推力,有时拱座需要加固处理;要求坝体能承受较高的应力。拱坝施工较重力坝复杂。拱坝坝型适用于两岸岩体坚硬完整的窄峡谷坝址。拱坝坝顶河谷宽度与坝高之比多数在4以下。支墩坝较重力坝可节约30%左右的坝体工程量,但施工复杂,模板工程量大,需要劳动力较多,坝体暴露表面多,在严寒地区,容易产生温度裂缝。这种坝型有逐渐减少或加厚的趋势。

此外还有砌石坝,具有与混凝土坝类似的优点,可以节省水泥,但需大量手工劳动,多用于劳动力低廉地区,现代大、中型工程已较少采用。

(董育坚)

bazhi

坝址 (dam site) 在规划利用的河段上可以修建壅水建筑物的区段。一般一个坝址包含几条适于布置挡水建筑物前缘的坝线。对坝址的基本要求是既能支承挡水建筑物(坝),又能形成水库。坝址除了要具备建坝和建库的地质、地形条件,不存在难以解决的工程地质和水文地质问题外,还宜具备有利于水电枢纽建筑物的布置,便于导流和施工,交通运输便利、天然建筑材料丰富,可形成较大库容,淹没、浸没损失较小等条件。当利用河段的地质条件不利时,对地质复杂或有重大地质问题的坝址,只要查清地质条件,通过工程处理也可建坝。中国和外国都有在地质条件很复杂的坝址建成高坝枢纽的先例。中国在喀斯特发育的乌

江渡水电站坝址成功的建成了高165 m的大坝。在预定的河段上选择良好的坝址是水电站工程建设的重要决策步骤之一。

类型 可分为峡谷、丘陵区坝址和平原区坝址。

(1)峡谷、丘陵区坝址。大多为岩基坝址,可以修较高的坝。两岸岩体雄厚完整的窄峡谷坝址一般适于建拱坝;宽峡谷坝址可修重力坝或重力坝与土石坝混合坝;岸边有泄洪条件及河床覆盖层深的坝址宜修土石坝;有些坝址能适应多种坝型。岩层走向与河流近垂直的坝址称横向谷坝址,倾角较陡时,对坝基和两岸防渗和抗滑稳定有利,且坝址河段内可能出露不同的岩层,可选择地质条件较优的区段作为坝线。岩层与河流近平行的坝址称纵向谷坝址。它往往对坝基及两岸防渗不利,一般岩层一岸倾岸里,另一岸倾岸外,倾岸里的岸坡稳定性较好,倾岸外的岸坡稳定性较差,且坝址河段内岩层变化小,对地质条件的选择性小。岩层与河流斜交的坝址,称斜向谷坝址,其性质介于上述两类坝址之间。

(2)平原区坝址。多为土基坝址,建坝条件较差,只适宜修土坝和低的重力坝。

重大地质问题 峡谷、丘陵区坝址常见的重大地质问题有:①缓倾角软弱夹层。它降低坝基和拱座的抗滑能力,可能引起坝的失稳。②大的断裂构造带。它可能构成坝基及岸坡的滑动边界,引起坝基和拱座的沉陷或压缩变形,产生渗漏及渗透变形等。③岸坡崩塌体、人的卸荷裂隙带、滑坡体等,可能造成岸坡失稳,近坝库岸滑坡可能引起水库涌浪。④河床深覆盖层及古河道,可能引起坝基渗漏和渗透变形、沉陷、抗震稳定性差等问题。⑤喀斯特洞穴,引起库、坝区的严重漏水等。

平原区坝址常存在的问题有:黄土、软土、粉细砂等不良土层问题和古河道、牛轭湖、决口口门、沙丘等不良水文地质构造问题,可能引起坝基及两岸的沉陷、滑动、渗透变形、抗震稳定性差等问题。

此外,坝址处于强地震区也是坝址的重大地质问题。

坝址选择 选择坝址时需要充分掌握可供比选坝址的基本资料,综合考虑地形、地质、枢纽布置、施工等条件,特别要重视各坝址存在的重大地质问题及处理方案的可靠性和经济性。有时水库淹没损失也是选择坝址的因素。一般以各坝址的代表坝线、坝型、枢纽布置及同等精度的设计,进行技术经济综合比较。最后根据综合反映投资、工期、工程效益、对环境的影响等因素的分析结果,结合技术条件的论证选定坝址。

(董育坚)



bazhi gongcheng dizhi kancha

坝址工程地质勘察 (engineering geologic investigation for dam site)

为选择坝址和查明坝址工程地质条件所进行的综合调查工作。大坝是水电工程的主要建筑物,其规模、类型及型式不同,对工程地质条件的要求也是不同的。另外,坝址除大坝外还有厂房、导流隧洞、泄洪隧洞、发电隧洞及溢洪道等其他建筑物。因此,坝址工程地质勘察不仅为大坝,同时还要为其他各种建筑物的设计和施工提供地质资料和工程地质评价。勘察工作是分阶段进行的,各阶段任务、内容、方法及成果是不同的。

勘察任务 ①规划勘察。主要是配合规划设计选择和确定建坝河段,调查各梯级坝段的工程地质条件,研究近期开发和控制性工程坝区的主要工程地质问题。②可行性研究勘察。在规划选定梯级的坝段,调查研究各比较坝址的工程地质条件,为选择坝址、初选基本坝型提供地质依据。③初步设计勘察。查明选定坝址的工程地质条件,为确定坝型、枢纽布置、坝线及地基处理方案提供地质资料。④技施设计勘察。进行工程地质专题研究,核实前期勘察资料及结论,为设计的调整和优化提供地质资料,并参加地基验收和处理的研究工作,提出施工、运行期地质监测的建议。

勘察内容 ①规划阶段。主要是了解坝段的河谷形态及地貌,出露地层和岩性及影响建坝的易溶岩、软岩(土)层的分布,构造断裂的发育程度、规模及其与河流方向的关系,岩体风化程度及特征,井、泉的分布及其与岩层、断裂、地貌的关系,河谷内坍滑体等的分布、规模及状态,大范围松散堆积物的来源,喀斯特形态、分布及与地貌、构造的关系,泥石流活动情况及形成条件等。②可行性研究阶段。是调查坝址的岩层分布及其物理力学性质,软弱岩层及夹层性状,各级断裂的分布及其组合,缓倾断裂的分布规律及性状,河床及两岸岩体风化带深度及卸荷范围,坝基岩体及断裂带的渗透性,相对隔水层埋藏深度,地下水类型、水位及动态,河床覆盖层厚度、结构及透水性,喀斯特发育规律,岸坡稳定条件等。③初步设计阶段。主要是查明坝址建筑物范围的覆盖层厚度、组成、渗透性、承载力、压缩变形、渗透比降及液化条件等,基岩的各向异性、变形特征及抗剪强度,软弱岩层或夹层的分布及物理力学性质,控制大坝稳定的断层的规模、产状及其空间变化规律,断层带物质的组成、性状、强度和水化学稳定性,岩体风化卸荷深度及渗透性,喀斯特发育深度,地下水埋深、动态、相对隔水层的埋藏条件,大坝下游抗力体及冲刷部位岩体性质、风化程度及完整性。上述研究内容可根据坝型及具体地质条件有所侧重。④技施设计阶段。主要是核实坝基(肩)各部位岩土体的变形、滑

动边界条件及计算参数,可利用基岩面的深度、坝基加固及防渗措施等专门地质问题。

勘察方法 ①规划阶段。主要是以 1:10000~1:5000 的综合工程地质测绘和物探为主,配合坑槽和少量钻探及室内试验工作。河床覆盖层、岸边岩体风化、坍滑、堆积体等厚度主要用物探了解。在有代表性的河谷横断面上,以钻孔和平硐探查覆盖层和风化卸荷深度。钻孔要穿过覆盖层并进入基岩一定深度,基岩分段压水测其渗透性,也可在钻孔内进行的综合测井;岸边的探硐一般穿过风化带至较新鲜的岩体内一定深度,用物探测定硐内岩体的弹性参数。取代表性的岩样,做室内物理力学性质试验。②可行性研究阶段。各比较坝址的勘察,是以 1:5000~1:2000 的工程地质测绘为基础,充分运用物探及坑槽探。在拟定坝址范围进行一定数量的钻探、硐探及岩石试验工作。坑槽探主要是配合地质测绘了解基岩表面的覆盖层厚度、揭露被掩盖的岩层界线、断层及接触关系。物探可测大范围的覆盖层和风化岩的深度及孔、硐岩层的弹性参数,追踪河床内的断裂带。各比较坝址的代表性剖面及辅助剖面,均布置一定数量的钻孔及平硐,勘探孔、洞位置和深度根据地形、地质条件及坝型和坝高确定,勘探点间距通常在 100 m 左右,但河床不宜少于 2 个钻孔;覆盖层较厚时进行抽水试验、基岩作压水试验,分别求得渗透系数和单位吸水量。按岩类取样,进行岩块物理力学性质试验。对于第四纪地层地基,以钻孔连续取样进行试验,分层测定物理力学性质指标,并在现场做原位测试,如标准贯入试验、十字板剪切试验等。③初步设计阶段。是在 1:2000~1:1000 工程地质测绘的基础上,根据坝型、坝高及地质条件,在建筑物范围内进行的详细勘探。一般沿各主要建筑物轴线布置勘探剖面,坝线上勘探剖面上下游还有辅助勘探剖面。高混凝土坝要求坝基(肩)岩体坚硬、完整、稳定性高。测绘中常用足够的坑槽,揭露被掩盖的软弱层带及其相互组合。坝肩和隧洞进出口宜用探硐查明风化层和卸荷带的分布和深度。地下厂房要有探硐进入厂区。勘探点的间距一般为 20~50 m,钻孔深度坝基一般约为 1/3~1/2 坝高,帷幕线上深度等于水头或达到相对隔水层内一定深度,喀斯特区除外。对于高拱坝,坝肩是重要的部位,勘探点根据稳定条件布置,除钻孔外,通常还每隔 30~50 m 高程布置一层探硐。岩土试验和水文地质试验都有适当的组数。对于土石坝,如河谷开阔,坝建于第四纪地层上,工程地质测绘比例尺可略小,尽可能利用物探配合钻孔,查明河床深槽、古河床、埋藏谷、溶洞的具体范围。勘探中坝基钻孔除需详细分层外,坝基持力层范围每一层都要取原状样进行试验;对软土、淤泥及粉细砂层类,除做原位测试外,还要根据需要做

室内三轴振动、管涌等试验。主要透水层的抽水试验一般不少于3次。勘探网的钻孔间距一般为50~100 m,帷幕线孔深度等于水头。本阶段多结合勘探工作,建立起地下水长期观测网和不稳定岩土体的监测点(网)。

④技施阶段。多属补充性专题勘察,内容根据具体项目要求和前期工作的深度而定。施工地质测绘的比例尺通常大于1:500。在坝基编录时,一般同时进行岩体弹性波速、点载荷和回弹仪等简易测试。在校核前期的勘察资料时,尽可能利用已有成果和施工开挖面,如发现新问题必要时也可补充勘探和试验工作。

勘察成果 坝址工程地质勘察的成果一般都编入各阶段工程地质报告。各阶段成果的内容和深度各不相同,但都是由图件和文字部分组成。具体可参见SDJ14-78《中国水利水电工程地质勘察规范》(试行)。(崔诗礼)

Baishan Shuidianzhan

白山水电站 (Baishan Hydropower Station)

位于第二松花江上游、吉林省桦甸市白山镇境内,以发电为主,兼有防洪、养殖等综合利用效益,是东北电力系统主要调峰、调频和事故备用电源。电站装机容量1500 MW,分两期建设。一期工程装机3台,总容量900 MW,保证出力167 MW,多年平均年发电量,一期为20.03亿kW·h,二期0.34亿kW·h。电站以220 kV电压接入东北电力系统。主坝为单曲三心圆混凝土重力拱坝,最大坝高149.5 m。一期主体工程于1975年开工,1983年第一台机组发电。二期工程装机2台,单机容量与一期相同,1984年一期工程结束后接续施工,1992年发电。

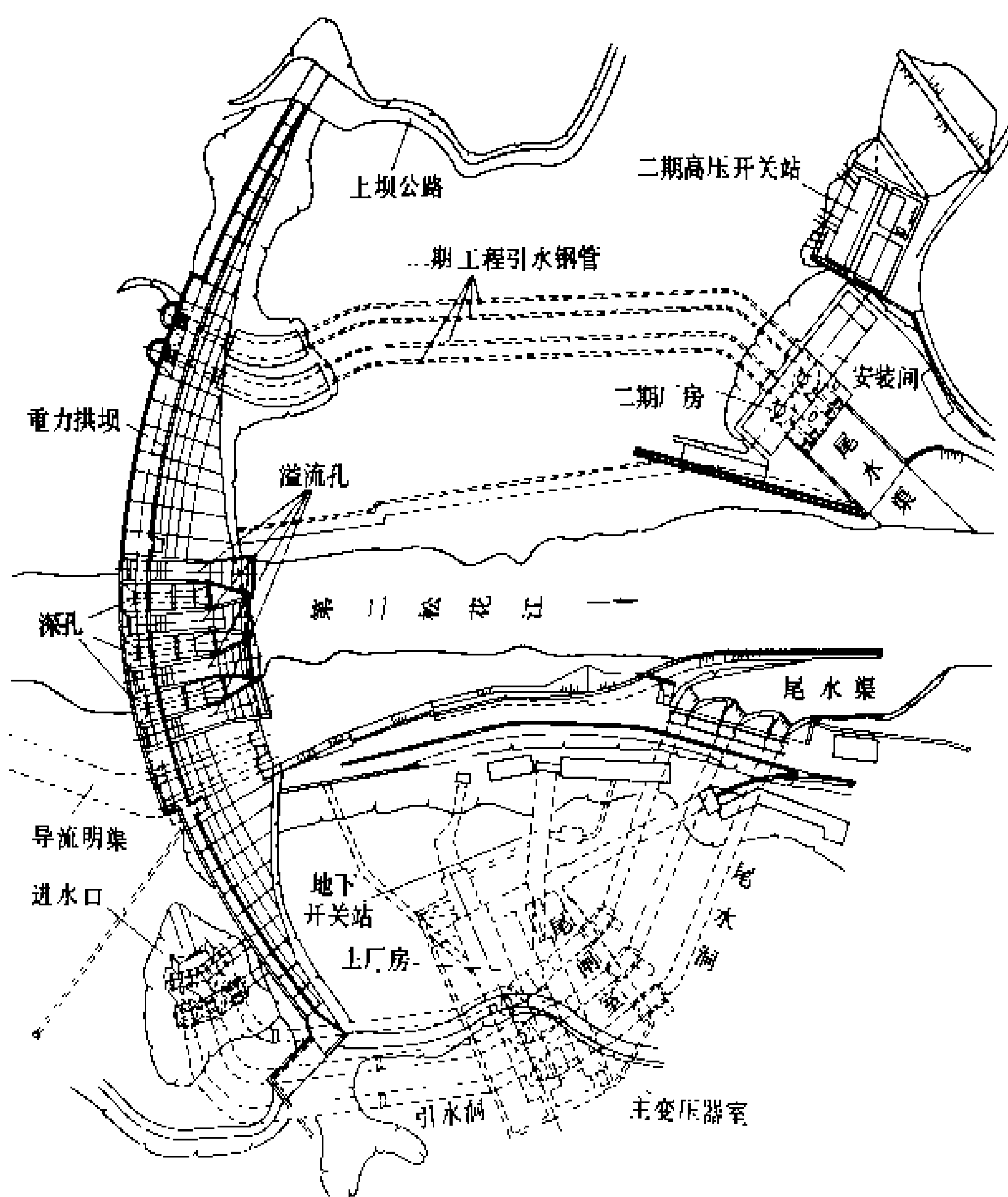
水文和水库特性 坝址以上流域面积1.9万km²,多年平均流量239 m³/s。水库正常蓄水位413 m,死水位,一期372 m,二期380 m。据水利电力部基本建设司1976年刊印的《全国大中型水电站》的数据,总库容62.15亿m³,为不完全多年调节水库。工程设计洪水标准为五百年一遇,相应流量为19100

m³/s,库水位418.3 m。校核洪水标准为五千年一遇,相应流量为26200 m³/s,水位420.0 m。最大可能洪水保坝,相应流量32200 m³/s,库水位423.45 m。电站最大水头126 m;一期最小水头81 m,设计水头110 m;二期最小水头86 m,设计水头112 m。

枢纽布置 见图。主要建筑物有单曲三心圆重力拱坝,河床坝段的泄洪建筑物,右岸一期厂房进水建筑物、地下厂房(参见彩图插页第36页71图),左岸二期岸边式厂房、引水钢管、防洪坝、屋外开关站等。(参见彩图插页第8页11图)

主坝弧长676.5 m,顶宽9~20 m,坝顶高程423.5 m。

右岸地下式厂房系统包括:进水建筑物、引水隧洞、地下厂房洞室、尾水洞及尾水调压井。地下厂房位于坝下游90 m处的山体中,厂房轴线方向为NE45°,上部结构采用喷锚支护,净空长121.5 m,宽25 m,高54.25 m。厂内安装3台竖轴混流式水轮发电机组,单机容量300 MW,水轮机转轮直径5.5 m,额定转速



白山水电站枢纽平面布置图

125 r/min。发电机为悬式空冷型,额定电压18 kV,定子铁芯直径12.3 m。发电进水口布置成倒“品”字形,

Bao 宝

1号和3号机的进水口中心高程为360 m, 2号机进水口中心高程为345 m。3个进水口均分设外露圆筒形闸门井, 井高53.5 m, 内径13 m。井内各设1道事故门槽和1道检修门槽。3个井共用1扇事故闸门和1扇检修闸门。3条引水隧洞长度分别为287.6 m, 242.8 m和223.2 m, 由7 m×10 m矩形闸下段、直径为8.6 m的上水平段、上弯段、渐变为直径为7.5 m的下弯段和下水平段组成。下水平段采用钢板衬砌, 长45 m。3条尾水洞长度分别为250.7 m, 222.3 m和196.88 m, 包括扩散段、渐变段和调压井。调压井为圆筒式, 高22.1 m; 面积分别为284 m², 302 m²和264 m²; 内设钢闸门。

一期主变压器布置在主厂房下游侧洞内, 地面高程303.5 m。发电机电压侧采用发电机-变压器组单元接线, 每一单元均临时连接到尾水平台上的1台220 kV少油断路器, 直送地区变电所。

左岸二期工程的岸边式厂房, 内装2台与一期工程相同的水轮发电机组, 屋外高压开关站布置在厂房左侧。

泄洪设施 一期工程坝体设4孔高孔堰, 表孔宽12 m, 高13 m, 校核洪水位时最大泄流量为6740 m³/s, 保坝水位时最大泄流量为8880 m³/s。设3个深孔, 孔口宽6 m, 高7 m, 校核水位时最大泄流量为3996 m³/s, 保坝水位时最大泄流量为4110 m³/s。5台机组最大引用流量1535 m³/s。

运行效益 白山水电站处东北电力系统中部, 是第二松花江开发的第一个梯级, 它与下游红石、丰满水电站群进行联合调度, 提高了全梯级运行效益。在防洪方面, 起拦洪削峰作用。

1986年一次洪水, 白山水库拦蓄水量

20.2亿m³, 使丰满水库入库洪峰由6736 m³/s削减为5528 m³/s, 削减21.8%。

设计单位和施工单位 东北勘测设计院设计, 水

利电力部第一工程局施工。

(李维藩)

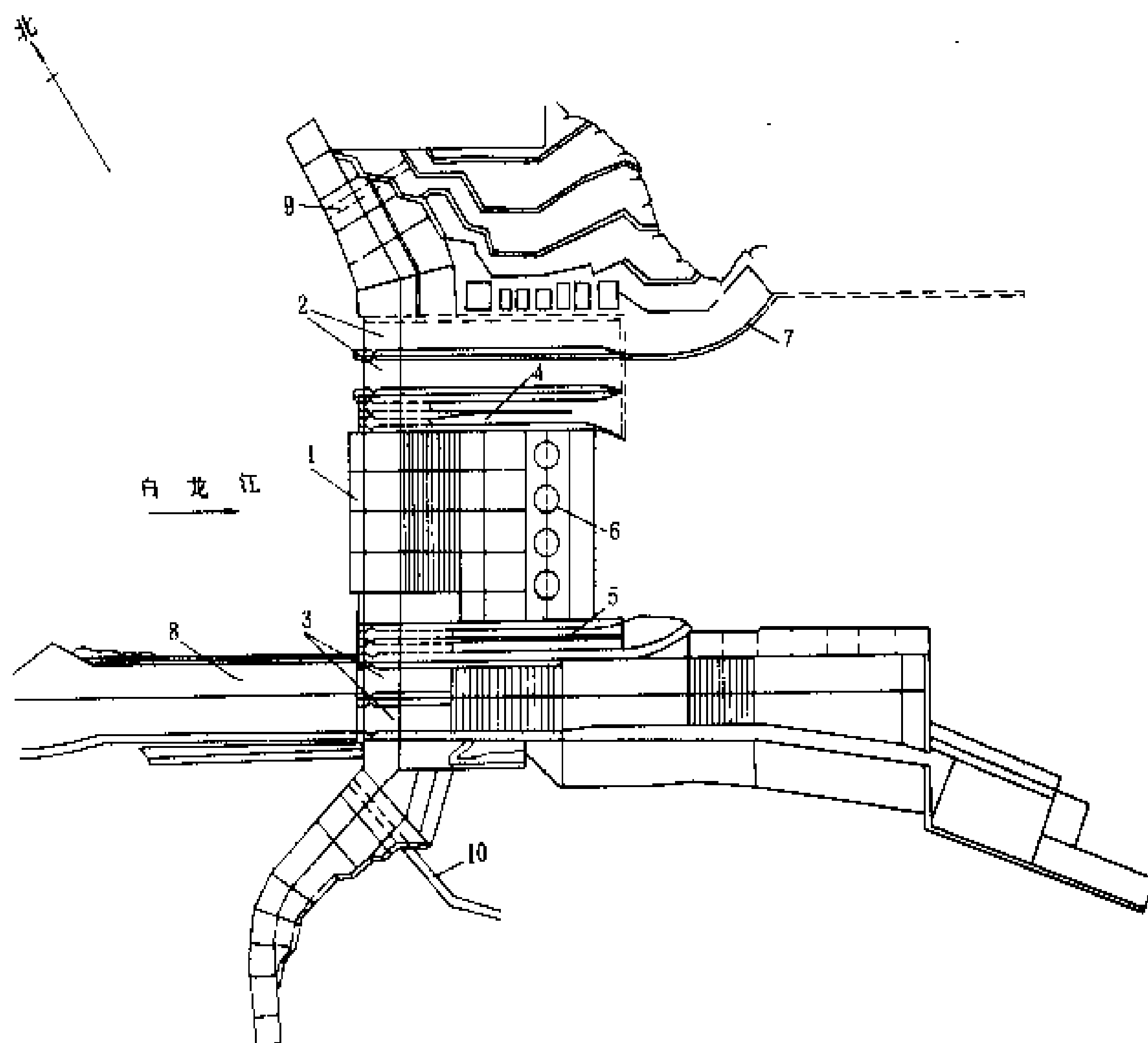
Baozhusi Shuidianzhan

宝珠寺水电站 (Baozhusi Hydropower Station)

位于四川省广元市境内嘉陵江支流白龙江下游, 距上游碧口水电站87 km, 以发电为主, 兼有灌溉、防洪等综合效益。装机容量700 MW, 保证出力156 MW, 年发电量23亿kW·h。以4回220 kV输电线路向成都、绵阳及南充地区供电。大坝为混凝土重力坝, 最大坝高132 m。工程于1989年10月开工, 计划1996年发电。

水文水库特性 坝址以上流域面积28428 km²。坝址多年平均流量336 m³/s, 多年平均年径流量106亿m³。千年一遇设计洪水流量18600 m³/s, 相应库水位588.3 m; 万年一遇校核洪水流量24300 m³/s, 相应库水位594.7 m; 总库容25.5亿m³。正常蓄水位588 m, 相应库容21.0亿m³; 死水位558 m, 调节库容13.4亿m³, 具有不完全年调节性能。

枢纽布置 坝址基岩主要为钙质粉砂岩, 岩石抗



宝珠寺水电站枢纽总布置图

1 坝; 2 表孔; 3 中孔; 4 左深孔; 5 右深孔; 6 厂房; 7 护坡; 8 导流明渠;

9 预留灌溉管; 10 工业引水渠

压强度较高, 断裂较为发育, 条带状砂岩段, 层间泥化夹层较为发育。枢纽由混凝土重力坝、泄水建筑物、引水发电建筑物、工业取水口及灌溉取水口等组成, 见

图。

混凝土重力坝坝顶高程 595 m，全长 524.5 m。泄水建筑物布置在厂房坝段两侧。左侧有 2 个表孔和 2 个底孔，右侧有 2 个中孔和 2 个底孔。表孔弧门尺寸 15 m×17.3 m，堰顶高程 571 m。中孔弧门孔口尺寸 13 m×15 m，进口底坎高程 560 m。底孔弧门孔口尺寸 4 m×8 m，右侧孔进口底坎高程 510 m，左侧孔进口底坎高程 530 m。表孔仅在超过千年一遇洪水时启用。各泄水建筑物均采用挑流消能方式。

厂房坝段位于河床中部，主厂房为坝后式，内设 4 台容量为 175MW 的混流式水轮发电机组。水轮机额定水头 84.4m，最大水头 103 m，最小水头 68.5m，转轮直径 5 m，转速 136.4 r/min。发电机为半伞式，额定电压 13.8 kV，额定功率因数 0.875。坝内压力钢管直径 7 m。4 台 250 MV·A 三相变压器，屋外高压 220 kV 开关站和副厂房均布置在厂坝间。左岸设有进厂交通洞。

右岸预留过木机的位置，初期只修建水库内混凝土导墩的基础部分。工业取水口设于右岸挡水坝段，取水口底板高程 540.0 m，最大引用流量 16 m³/s。灌溉取水口布置在左岸第 25 号坝段，设计引用流量 37 m³/s，年引水量 10 亿 m³，远景规划可灌溉嘉渠地区 233 万亩农田。

工程施工 采用高土石围堰断流，右岸大明渠导流，基坑全年施工的导流方式。对外交通采用公路运输。主体工程土石方开挖约 200 万 m³，混凝土浇筑 232 万 m³，钢筋、钢材及金属结构约 5.8 万 t。

设计及施工单位 西北勘测设计院设计，水利电力部第五工程局施工。

(潘长龄)

baozheng chuli

保证出力 (firm power; guaranteed output)

水电站(群)在与设计保证率相应的不利水文时段(如枯水年)的平均出力。水电站设计保证率是指水电站运行过程中,正常工作不遭破坏的概率,即时段平均出力大于或等于保证出力的概率。

设计保证率有两种表示法:①水电站正常工作不遭破坏的历时与总历时的比值。②水电站正常工作不遭破坏的年数与总年数的比值。第①种表示法比较常用。

设计保证率与可靠性不同,它是以水电站功率为基础的。水电站设计保证率的选择是一个复杂的技术经济问题,由于在设计保证率以外(即当保证率大于设计保证率时),因水电站出力减小而导致电力系统的损失难以估算,故在规划设计中,一般按规范规定选用。

中国《水利水电工程水利动能设计规范(试行)》规定水电站设计保证率如下表。

中国规定的水电站设计保证率

电力系统中水电容量的比重(%)	25 以下	25~50	50 以上
水电站设计保证率(%)	80~90	90~95	95~98

水电站保证出力是水电站最重要的技术指标之一,也是水电站能量的基础,在进行水电站规划设计时是按水电站的保证出力进行电力平衡、确定容量效益的。水电站保证出力的大小与开发方式、水文特性、电站调节性能和调节方式有关。对于河流梯级开发或跨流域水电站群,则常有水文补偿、梯级径流补偿及跨流域电力补偿调节,提高水电站群保证出力的效益。因此,对梯级电站及同一电力系统中的水电站群,应以与设计保证率相应的水电站群的总保证出力为规划设计的基础,单独水电站的保证出力意义较小。

当出现大于设计保证率的特枯水年或特枯水季时,系统的正常运行将遭到破坏,规划设计中,可考虑动用一半的火电厂备用容量以补水电站出力的不足。

近年来人们对保证出力的理解,有所发展,即保证出力不是一个单纯的指标,而应是出力的年过程,即按径流调节以后,将水电站(群)的出力按月(或旬)分别自大至小排队求出各月(或旬)的保证率曲线,然后按设计保证率求出各月(或旬)的相应出力,即为其保证出力过程。这种保证出力过程,对各月(或旬)均具有相同的保证率。

(伍宏中)

Baoguchang Shuidianzhan

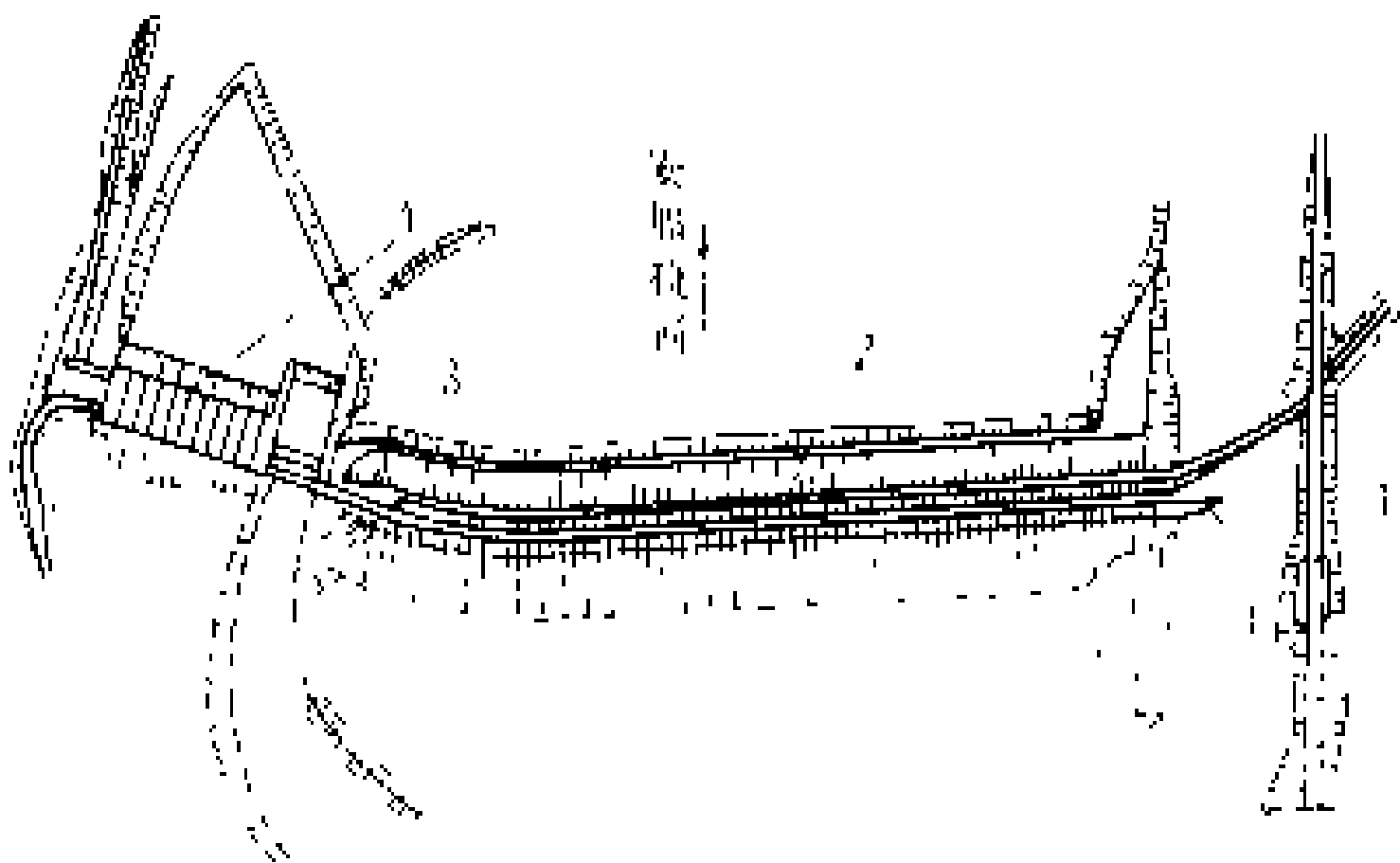
鲍古昌水电站 (Boguchang Hydropower Station)

位于苏联西伯利亚安加拉河中游乌斯特-伊里姆水电站下游 375 km 处。工程分期建设,最终装机容量 4000 MW,多年平均年发电量 178 亿 kW·h,第一期装机 3000 MW。将以 220 kV 高压、500 kV 超高压输电线路分别向地区工业和西伯利亚联合电力系统供电。工程除发电效益外,还有供水效益。工程于 1979 年开始施工准备,1987 年完成一期导流工程后,河道截流,尚未建成发电。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 88.1 万 km²,多年平均年径流量 1070 亿 m³。正常蓄水位 268 m,相应库容 582 亿 m³,水库面积 2826 km²,调节库容 33 亿 m³。千年一遇洪水设计,洪峰流量 15190 m³/s;万年一遇洪水校核,洪峰流量 16700 m³/s。水电站设计水头 65.5 m。

baoyu

枢纽布置 坝址区基岩为粗面岩。电站枢纽由土石坝、混凝土重力坝、坝后式厂房和通航过木建筑物组成，见图。混凝土重力坝长 756 m，土石坝长 1833 m，挡水前沿长 2589 m。



鲍古昌水电站枢纽布置图

1—过木道；2 土石坝；3 混凝土重力坝；4-发电厂房

混凝土重力坝最大坝高 87 m，包括厂房坝段、溢流坝段及挡水坝段。挡水坝段及厂房坝段位于滩地上。溢流坝段位于厂房坝段左边河床左侧部分，坝底设 5 个 14 m×12 m 导流底孔。水库蓄水、导流底孔封堵后，利用 10 个深孔作后期导流和永久泄洪用。溢流坝右端设临时船闸，作施工期通航和泄洪用。

机电设备 12 台水轮发电机组，单机容量 333 MW。水轮机为立轴混流式，转轮直径 7.5 m，转速 90.9 r/min，设计水头 65.5 m 时，引用流量 570 m³/s。发电机为伞式，功率因数 0.9，电压 15.75 kV，采用晶闸管静止式励磁。

主要工程量 土方开挖 263 万 m³，石方开挖 927 万 m³，土石方回填 4024 万 m³，混凝土浇筑 324 万 m³，金属结构安装 8.58 万 t。

(高又生)

baoyu

暴雨 (rainstorm) 强度很大的降雨。暴雨标准世界各地不统一。中国气象部门规定：1 h 降雨达到或超过 16 mm，12 h 达到或超过 30 mm，24 h 达到或超过 50 mm 的为暴雨；24 h 达到或超过 100 mm 的为大雨；24 h 达到或超过 200 mm 的为特大暴雨。暴雨是常见的一种灾害性天气。强度特大和持续性暴雨常引起山洪暴发、河水泛滥和泥石流，造成严重的洪涝灾害，或造成水库、闸坝、堤防等水工建筑物的破坏。但适度的暴雨也是水资源的重要补给来源，可用来兴利。

暴雨成因 产生暴雨的主要物理条件是充沛的水汽、强盛持久的气流上升运动和不稳定的大气结构。在各种尺度天气系统的相互作用与有利地形相配合下往往产生大暴雨。影响中国暴雨的天气系统主要有锋面、

气旋、切变线、低涡、低压槽等西风带低值系统和台风(热带风暴)、东风波、热带辐合带等低纬度热带天气系统。前者影响中国大部分地区；后者主要影响华南和东南沿海各省。个别深入内陆的台风也能产生特大暴雨。在干旱和半干旱地区，局部地区的热力强对流天气也能产生历时短、范围小、强度特大的雷暴雨。

中国暴雨时空分布 世界各地暴雨时间和空间分布很不均匀。以中国为例，暴雨集中在 4 个时期。4～6 月主要出现在南岭以南地区，是华南前汛期暴雨出现的季节。在华南沿海已多次出现 24 h 降雨超过 600 mm 的特大暴雨。6～7 月暴雨主要出现在长江淮河流域，是长江中下游梅雨季节，特点是强度较小、持续时间长、分布面广、降雨总量大。1954 年 6～7 月江淮流域出现持久性梅雨锋面暴雨，长江和淮河都出现了几十年来最大的洪水。7～8 月是西南和东南季风最活跃季节，暴雨主要出现在四川西部、华北、东北一带。东南沿海受台风影响，多台风暴雨。台风登陆后也可以影响华北和东北地区。在此季节出现的暴雨，强度较大，分布面也较广。1963 年 8 月上旬停滞在河北省太行山东麓的低气压暴雨，在猗松站 7 天降雨 2051 mm，最大 24 h 降雨达 950 mm。1975 年 8 月上旬在河南省南部伏牛山东麓出现特大台风暴雨，林庄站 8 月 7 日 24 h 降雨达 1060 mm。1977 年 8 月 1 日在内蒙古和陕西交界处、毛乌素沙漠边缘地区出现了特大强雷暴雨，乌审旗木多才当 10 h 降雨 1400 mm(调查值)，创中国最高记录。9 月份以后，随东北季风暴发，雨区南撤，但东南沿海一带仍受台风侵袭和南下冷空气影响，大暴雨仍可能出现。在台湾北部，1976 年 11 月 17 日新寮 24 h 降雨 1672 mm，17～19 日 3 天降雨 2749 mm，仅次于法属留尼汪岛锡劳斯的 24 h 雨量 1870 mm 与 3 日总降雨 3240 mm，居世界第 2 位。

参考书目

陶诗言等著，中国之暴雨，北京：科学出版社，1980

(陈志恺)

baoyu diaocha

暴雨调查 (storm investigation) 对早期出现过的和近年发生的特大暴雨的调查工作。目的是弥补雨量站网观测资料不足和延长暴雨资料系列。暴雨调查是水文调查工作中一项重要内容，对于设计暴雨计算、设计洪水分析及其成果合理性的论证有重要作用。规划设计中经常采用的年最大暴雨频率等值线图，编制时便采用了暴雨调查资料。暴雨调查内容一般包括暴雨量、强度、过程、暴雨中心位置、雨前及当时天气形势、地面天气状况以及灾害情况等。调查方法主

要是访问、考察、查勘、测量、向有关单位搜集各种历史文献资料 and 前人调查记录和分析研究报告。中国近年来对早期出现过的大暴雨,如辽宁西部 1930 年 8 月大暴雨及长江中游 1935 年 7 月特大暴雨,进行了大量调查工作,提出分析报告,并绘制了暴雨等值线图。对当年发生的大暴雨及时进行调查,不仅可以弥补现有雨量站实测资料的不足,还可以通过分析、比较,发现和纠正观测资料中的问题,核实数据。1977 年陕西、内蒙古交界处罕见的大暴雨,17 h 中心雨量为平均年雨量的 3 倍,经过调查发现暴雨中心雨量站的记录偏小甚多。1975 年 8 月淮河大暴雨经调查后,也订正了 279 个测站部分有问题的资料。

(庄德楨)

baozha lixue

爆炸力学 (mechanics of explosion) 研究爆炸的发生和发展规律以及爆炸的力学效应的利用和防护的学科,是力学的一个分支。它从力学角度研究化学爆炸、核爆炸、电爆炸、粒子束爆炸(也称辐射爆炸)、高速碰撞等能量突然释放或急剧转化的过程和由此产生的强冲击波(又称激波)、高速流动、大变形和破坏、抛掷等效应。爆炸力学是力学、物理学和化学之间的一门交叉学科。

爆炸力学研究的是高功率密度的能量转化过程,大能量通过高速的波动来传递,历时特短,强度特大。爆炸力学的研究常需考虑力学因素和化学物理因素的耦合、流体特性和固体特性的耦合、载荷和介质的耦合等。多学科渗透和结合成为爆炸力学发展的必要条件。爆炸现象十分复杂,并不要求对所有因素都进行精确的描述,抓住主要矛盾进行实验和建立简化模型,特别是运用和发展各种相似律或模型律,具有重要意义。爆炸波在介质中的传播以及波所引起的介质的流动、变形、破坏和抛掷现象是爆炸力学研究的中心内容。高温、高压、高应变率条件下,介质的力学性质和本构关系是爆炸力学重要的内容之一。化学爆炸分为爆轰和爆燃两种反应方式。爆轰的反应传播速度远大于声速,速度固定,不受外部条件影响,反应面的密度大于反应前。爆轰的流体力学理论是波在可反应介质中当化学反应和力学因素强烈耦合时的流体力学理论。气相、液相、固相、混合相介质的稳态和非稳态爆轰,爆燃和爆轰间的转化,起爆机理和爆轰波结构都是爆轰学研究的对象。此外还有与工程应用直接相联系的工程爆破理论和技术。

在矿业、水利和交通运输工程中,用炸药爆破岩石(爆破工程)是必不可少的传统方法。现在定向爆破、光面爆破、预裂爆破等控制爆破技术应用日益广泛。爆炸

在机械加工方面也有广泛的应用,如爆炸成型、爆炸焊接、爆炸合成金刚石等。爆炸防护在工业安全方面有特殊重要的地位。井下瓦斯爆炸、天然气爆炸、粉尘爆炸等都是生产上十分关心的问题。爆炸力学在军事科学技术中起着重要作用。

(殷有泉)

beiyong rongliang

备用容量 (reserved capacity) 水电站为担负电力系统计划外的负荷而设置的容量。其中包括事故备用容量和负荷备用容量。

事故备用容量 担负电力系统由于机组事故而甩掉的负荷的容量。线路故障问题,多以提高线路可靠性来解决。电力系统机组事故,与运行机组台数及其被迫停运率(即事故率,等于机组故障时间除以故障及无故障总时间的商值)有关。被迫停运率水电站远比火电站为小。

设电力系统有 n 台机组,每台机组平均被迫停运率为 p ,则 m 台机组同时发生事故的概 率 $P(m)_n$ 可用下式表达

$$P(m)_n = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m (1-p)^{n-m}$$

装 m 台机组为备用时,系统运行可靠性 $R(m)_n$ 可以下式表达

$$R(m)_n = \sum_{m'=0}^m P(m')_n。$$

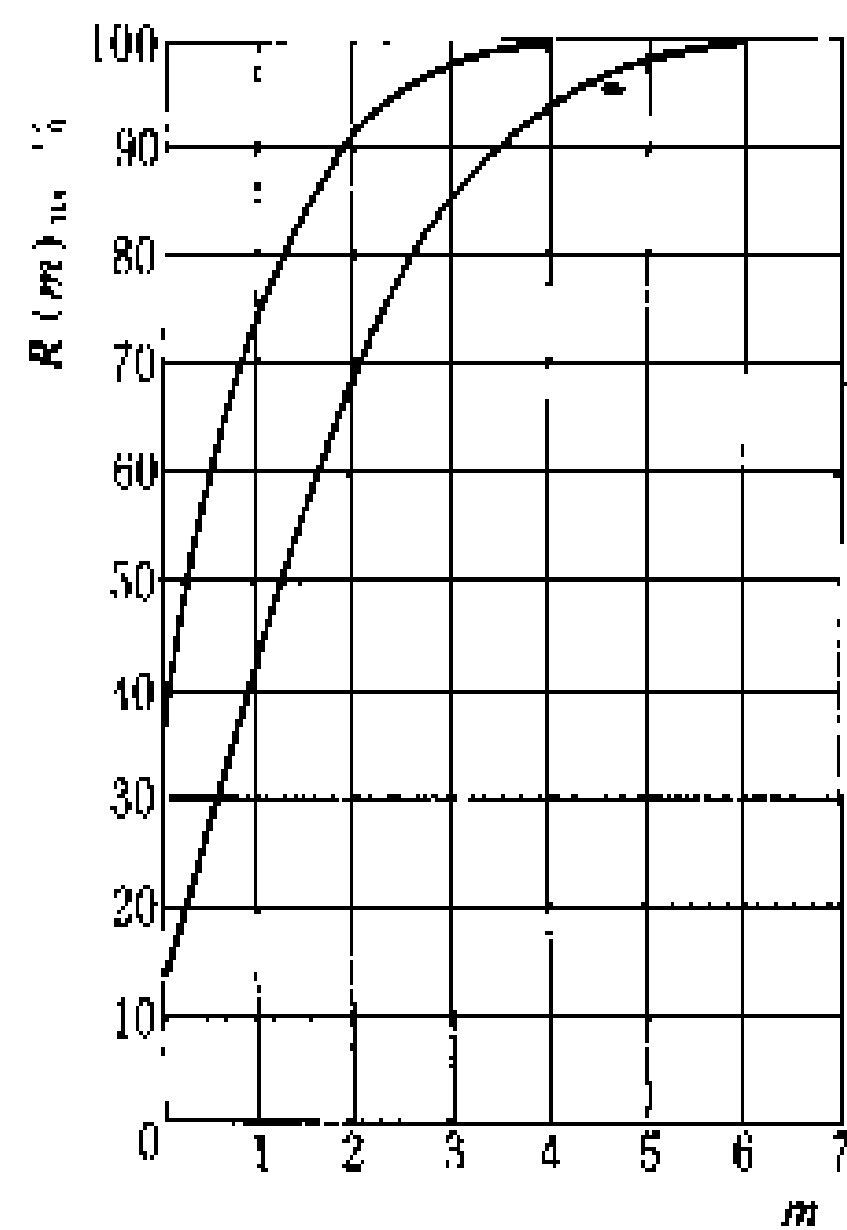
当 $n=100$, $p=1\%$ 及 $p=2\%$ 时, m 台机组同时发生事故的概 率及装 m 台机组为备用时,系统运行可靠性见表及图。

系统运行可靠性

m	$P(m)_n$		$R(m)_n$	
	$p=1\%$	$p=2\%$	$p=1\%$	$p=2\%$
0	0.3660	0.1326	0.3660	0.1326
1	0.3702	0.2710	0.7362	0.4036
2	0.1845	0.2700	0.9207	0.6736
3	0.0610	0.1825	0.9817	0.8561
4	0.0149	0.0904	0.9966	0.9465
5	0.0029	0.0353	0.9995	0.9818
6	0.0000	0.0114		0.9932
7	0.0000	0.0031		0.9962
8	0.0000	0.0000		

由表及图可知,在一定的机组数及被迫停运率的情况下,系统需要的备用容量随系统运行可靠性要求的增加而增加。但当备用容量达到一定数量时,增加的备用容量其利用率是很小的,对系统运行可靠性增加值的贡献也是微不足道的。由于电力系统运行可靠性

是关系到停电损失的一个复杂的技术经济问题,故系统事故备用容量也是复杂的技术经济问题。



当 $n=100$ 时, $m=R(m)_n$ 的曲线图

系统规划中,应在技术、经济分析的基础上选择系统可靠性,从而相应确定系统的事故备用容量。同一电力系统,在不同的情况下,可以有不同的事故备用容量值。在缺乏停电经济损失资料时,常按一般经验选用。中国事故备用容量,一般采用系统最大负荷的 8%~10%。水电站由于

起停快、增加容量的造价较低,故宜多担系统事故备用,火电厂也可以热备用的方式担负系统部分事故备用。系统事故备用容量的分配除要进行经济论证外,还要考虑如下因素:①系统事故备用容量不宜过分集中在一个或少数电站。②一个电站所分配的事故备用容量占装机容量的比重不宜过大。③担负事故备用容量的电站宜靠近负荷中心。④水电站担负系统事故备用容量,应有足够的事故备用库容。

负荷备用容量 为适应电力系统频繁的负荷变化,使电力系统的频率稳定于容许的范围内,以保证供电质量而预留的发电容量。电站担负负荷备用都是旋转备用(即接入系统运行的机组留有适当容量担负备用)的方式。电力系统的负荷备用容量一般为电力系统最大负荷的 3%~5%。频繁起停的用户(如轧钢、电气交通)占比重较大的系统,要求负荷备用较大。水电站起停快,运行灵活,应多担负系统负荷备用,但长引水道及径流式水电站应分别少担负及不担负负荷备用。火电机组担负负荷备用,只限于运行中机组额定出力与技术最小出力差值的一半。火电厂由于担负负荷备用会带来额外的燃料消耗。

有时由于机组计划检修导致系统容量不足,需增加的容量,人们习惯称为检修备用容量。其实,这部分容量,也常兼作其他用途。

在运行中,系统的备用容量并不是一成不变的,而是根据系统负荷和水电站的能源情况而变化的,而且备用容量在各电站间及在本电站内,也是可以转化的。如水电站在丰水年或丰水季节,工作容量宜大些,备用容量应小些,甚至不担备用,备用容量较多或全部转到火电厂。

(伍宏中)

bēng tā

崩塌 (land fall) 陡坡上部岩(土)体在重力作用下,崩落堆积于坡脚的现象。规模极大、突然的崩塌称为山崩。在土体中发生的崩塌也称土崩。在坡麓地带堆积的岩质崩塌物称倒石堆。崩塌冲击力强、破坏性大,往往造成交通断绝、河道堵塞以及人员的伤亡,是山区常见的地质自然灾害。1933 年中国四川省迭溪地震时发生山崩堵塞岷江干流,形成迄今犹存的堰塞湖。

岩体崩塌形式 ①散块崩落。岩块沿斜坡以滚动或跳动的方式向下崩落。②块体翻落。与斜坡脱开的块体在失去平衡后,以翻落的形式向下崩落。③整体坠落。整块岩体沿地质结构面滑动,脱离基岩后呈自由落体状态坠落。

崩塌形成条件 崩塌与斜坡的地形、地质条件密切相关。一般崩塌多发生在高而陡峻的岩质边坡,在地势高差大的峡谷山区,崩塌现象比较普遍。陡坡上部岩体被平行边坡方向的高倾角裂隙切割,最有利于崩塌的形成。岩性软硬不一的坡体,常因底部软层的风化剥蚀或水流淘蚀,使上部岩体失去支撑而崩塌。促进崩塌发生的外部因素有风化作用、水作用、地震及人为因素等。如强烈地震或特大暴雨往往会急剧改变斜坡的稳定条件而发生大规模的崩塌,不适当的施工爆破和坡脚开挖,也常直接触发崩塌。

崩塌防治 需结合斜坡的地形地质条件,因地制宜采用或综合考虑削坡、锚固、排水、修建支挡建筑物以及防止风化等防治措施。

(邹小安)

bǐ zhuǎn sù

比转速 (specific speed) 相似水轮机在 1m 水头下发出 1 kW 出力时所具有的转速,用 n_s 表示。比转速 n_s 是反映水轮机技术经济的综合指标。

对于反击式水轮机,比转速

$$n_s = \frac{n \sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (1)$$

或

$$n_s = 3.13 n'_1 \sqrt{Q'_1} \eta \quad (2)$$

式中 η 为水轮机效率,%; n 为水轮机额定转速, r/min; P 为水轮机出力, kW; H 为水轮机工作水头, m; Q'_1 为模型水轮机单位流量, L/s; n'_1 为模型水轮机单位转速, r/min。

对于冲击式水轮机

$$n_s = 214 \sqrt{Z} \frac{d_0}{D_1} \quad (3)$$

式中 Z 为喷嘴数; d_0 为射流直径, m; D_1 为转轮公称直径, m。

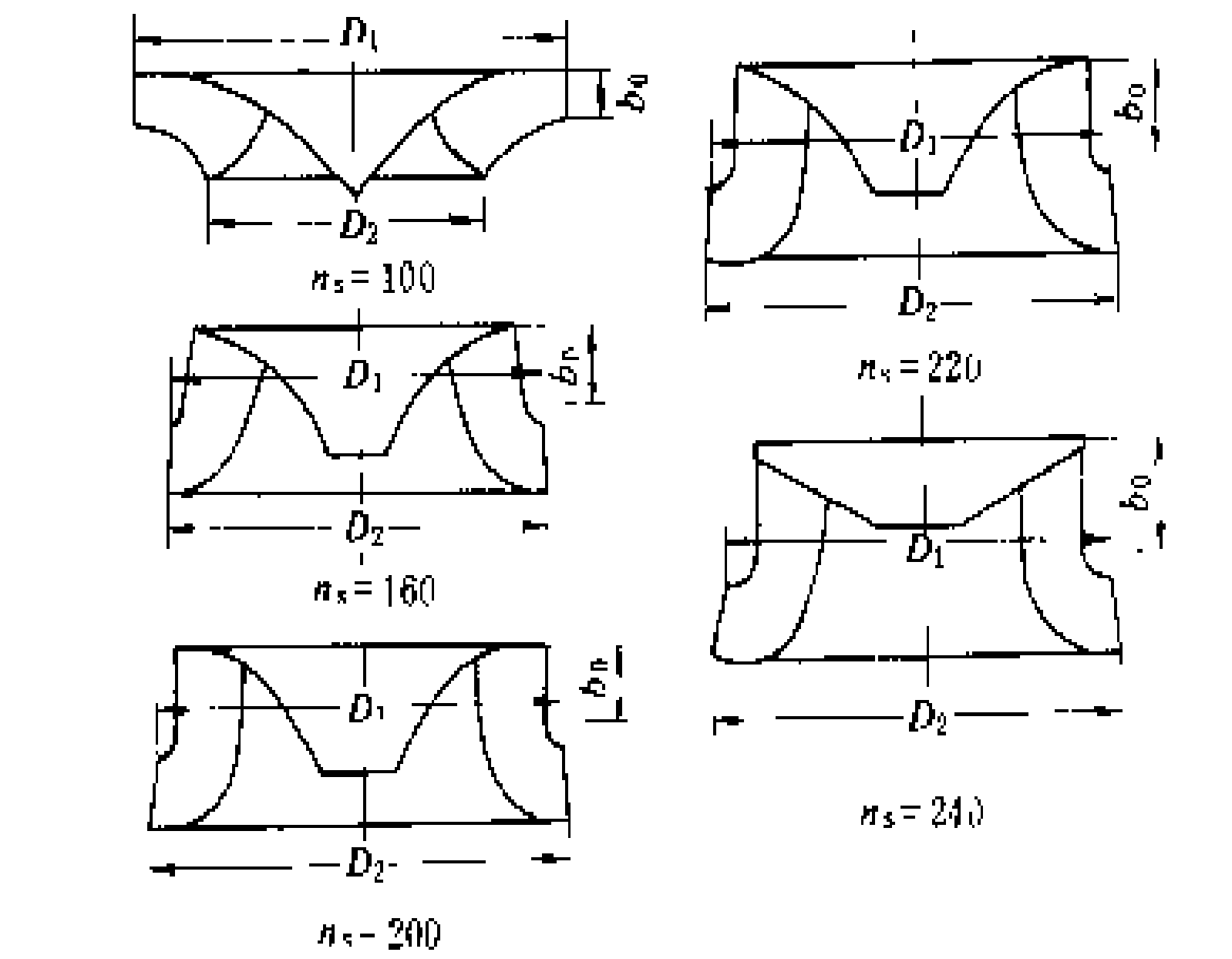
比转速具有随水头增大而下降的特点, 各型水轮机的比转速 n_s 大致如下表范围, 并随着技术进步在不断提高。

各型水轮机比转速 n_s 和水头范围

型 式	水头范围(m)	n_s 范围(m · kW)
轴流式水轮机	3~80	900~200
混流式水轮机	30~700	350~50
冲击式水轮机	300~1800	35~10(单嘴)

反击式水轮机的比转速 当水头、出力都已确定时, 它直接反映转速水平。近代水轮机发展的主要趋势是保持水轮机高效率、低汽蚀情况下提高其比转速, 以生产出性能好、尺寸小、造价低的水轮机。提高单位流量、单位转速或水轮机效率, 都可提高比转速, 由于提高单位转速受圆周速度限制, 效率的提高也十分有限, 以增大单位流量较为有效, 然而又受汽蚀强度的限制, 故比转速提高十分缓慢。(见水轮机汽蚀和磨损)

不同比转速的混流式水轮机, 其通流部件的形状也不同, 如图。比转速愈低的水轮机, 其导水叶高度愈小, 进水流道愈狭窄, 转轮叶片数愈多, 转轮出口直径比进口直径也愈小。 $n_s=200$ 的水轮机, 转轮进、出口直径接近相等, $n_s<200$ 的水轮机, 转轮进口直径大于出口直径, $n_s>200$ 的水轮机其出口直径都大于进口直径。轴流式水轮机也有类似规律, 比转速愈高, 进水流道愈宽, 导水叶高度愈高, 叶片数愈少。



混流式水轮机转轮外形图

冲击式水轮机的比转速 当射流直径和转轮直径已确定时, 冲击式水轮机的比转速与喷嘴数的平方根 \sqrt{Z} 成正比, 提高 n_s 的途径主要是增加喷嘴数, 目前国际上喷嘴数最多的为 6 个喷嘴的水轮机, 但喷嘴数的增加也受到结构、强度等限制, 特别是水头超过 800 m 时。

(青长庚)

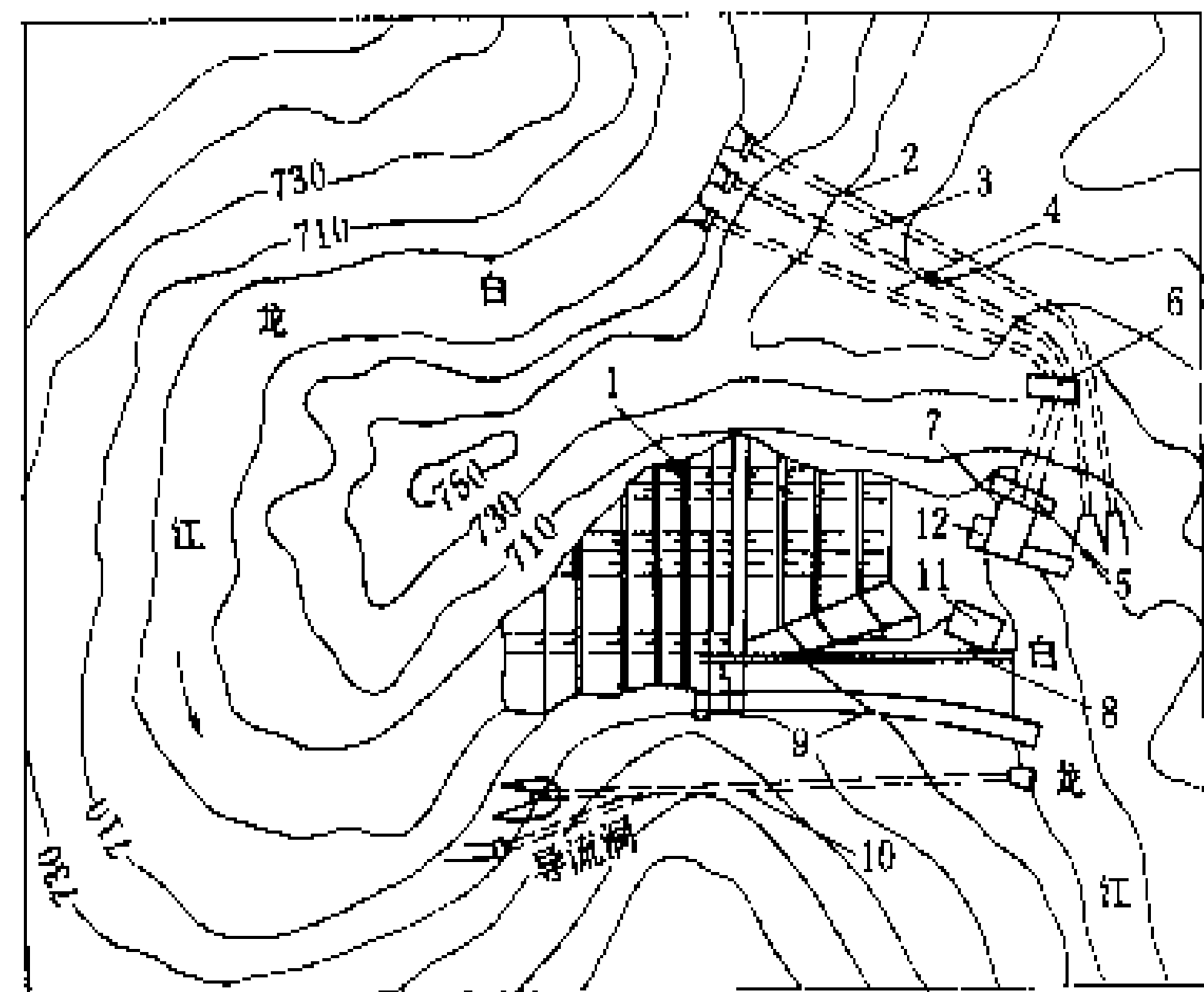
Bikou Shuidianzhan

碧口水电站 (Bikou Hydropower Station)

位于甘肃省文县境内嘉陵江支流白龙江上, 以发电为主, 兼有防洪、灌溉、过木等综合利用效益。装机容量 300 MW, 保证出力 78 MW, 多年平均年发电量 14.63 亿 kW · h, 以 110 kV 和 220 kV 电压分别向陕西、四川送电。主坝为壤土心墙上石混合坝, 最大坝高 101.8 m。工程于 1969 年 5 月开工, 1976 年第一台机组发电, 1977 年竣工。(参见彩图插页第 36 页 72 图)

水文和水库特性 坝址以上流域面积 26000 km², 多年平均年径流量 90 亿 m³。工程设计洪水标准: 五百年一遇设计, 五千年一遇校核。设计洪水流量 7630 m³/s, 水位 703.3 m。校核洪水流量 9950 m³/s, 水位 708.8 m。水库正常蓄水位 704 m, 防洪限制水位 695 m, 死水位 685 m。水库总库容 5.21 亿 m³, 调节库容 2.21 亿 m³, 死库容 2.29 亿 m³, 防洪库容 1.91 亿 m³。为季调节水库。电站最大水头 86.2 m, 设计水头 73.0 m, 最小水头 57.5 m。

枢纽布置 枢纽主要由拦河坝、泄洪洞、排沙洞、过木道、引水洞、发电厂房及开关站等建筑物组成, 见图。



碧口水电站枢纽布置图

- 1—拦河坝; 2 有压泄洪洞; 3 排沙洞; 4—引水洞; 5—厂房; 6 调压井; 7 尾水渠; 8—过木道; 9—溢洪道; 10 无压泄洪洞; 11—220kV 屋外开关站; 12 110kV 屋外开关站

坝基为干枚岩和变质凝灰岩, 砂砾石覆盖层厚 25~34 m。拦河坝坝顶高程 710 m, 坝顶总长度 297 m。坝体下前后做了 2 道混凝土防渗墙, 一道宽 1.3 m, 深 41 m; 另一道宽 0.8 m, 深 62.5 m。封闭式地面厂房位于左岸岸边。发电引水洞直径 10.5 m, 最大引用流量 480 m³/s。调压井与快速闸门井结合在一起, 调压井为地下阻抗式方形竖井, 最大容积 30000 m³。厂内安装 3 台竖轴混流式水轮发电机组, 单机容量为 100

bian 边

MW。水轮机转轮直径 4.1 m，额定转速 150 r/min。发电机为悬式空冷型，额定电压 13.8 kV。220 kV 和 110 kV 开关站设在下游尾水渠右岸台地上。木材过坝，采用纵向链式运输机，布置在右岸，长 420 m，年过坝能力为 50 万 m³，现已停止使用。

泄洪设施 右岸岸边设 1 孔开敞式溢洪道，孔口宽 15 m，高 16 m，堰顶高程 691 m，最大泄流量 2310 m³/s，单宽流量 154 m³/（s·m），最大流速 39 m/s。右岸无压泄洪洞，洞身为方形，宽 13 m，高 11.5 m。孔口底坎高程 647 m，最大泄流量 2250 m³/s，洞内最大流速 35.7 m/s。左岸有压泄洪洞，为圆形断面，直径 10.5m，孔口底坎高程 655 m，最大泄流量 1710 m³/s，洞内最大流速 34 m/s。此外，左岸有压排沙洞，为圆形断面，直径 4.4 m，最大泄流量 296 m³/s，孔口底坎高程 636m，必要时也可参加泄洪。

设计和施工单位 西北勘测设计院设计，水利电力部第五工程局施工。

（杨金栋）

bianjieceng

边界层（boundary layer）粘性流体流动时，在边壁或界面附近存在的流速梯度很陡的薄层，亦称附面层。如：水电站溢流坝面水流（见掺气水流）、挑流消能形式中的水射流等，都存在边界层问题。边界层内，因粘性流无滑动的条件，粘附于物面的流体速度为零，或者外层流体速度为零，则沿界面外法向流速以很陡的梯度上升，直至达到边界层外的流速值。边界层外，仍保持着不受边壁或界面扰动的来流速度分布，可视为流体粘性不起作用的势流区。

边界层研究内容主要有：层流边界层的稳定性、层流边界层向紊流边界层的过渡、紊流边界层中质量动量热量的传递、边界层的阻力、边界层的分离、边界层的控制、复杂边界的三维边界层等。水电工程中的边界层问题，常是大雷诺数，非直线陡底坡（纵向压力梯度 $\frac{dP}{dx} \neq 0$ ）、水力粗糙边壁，有时还是有自由面的三维流动。

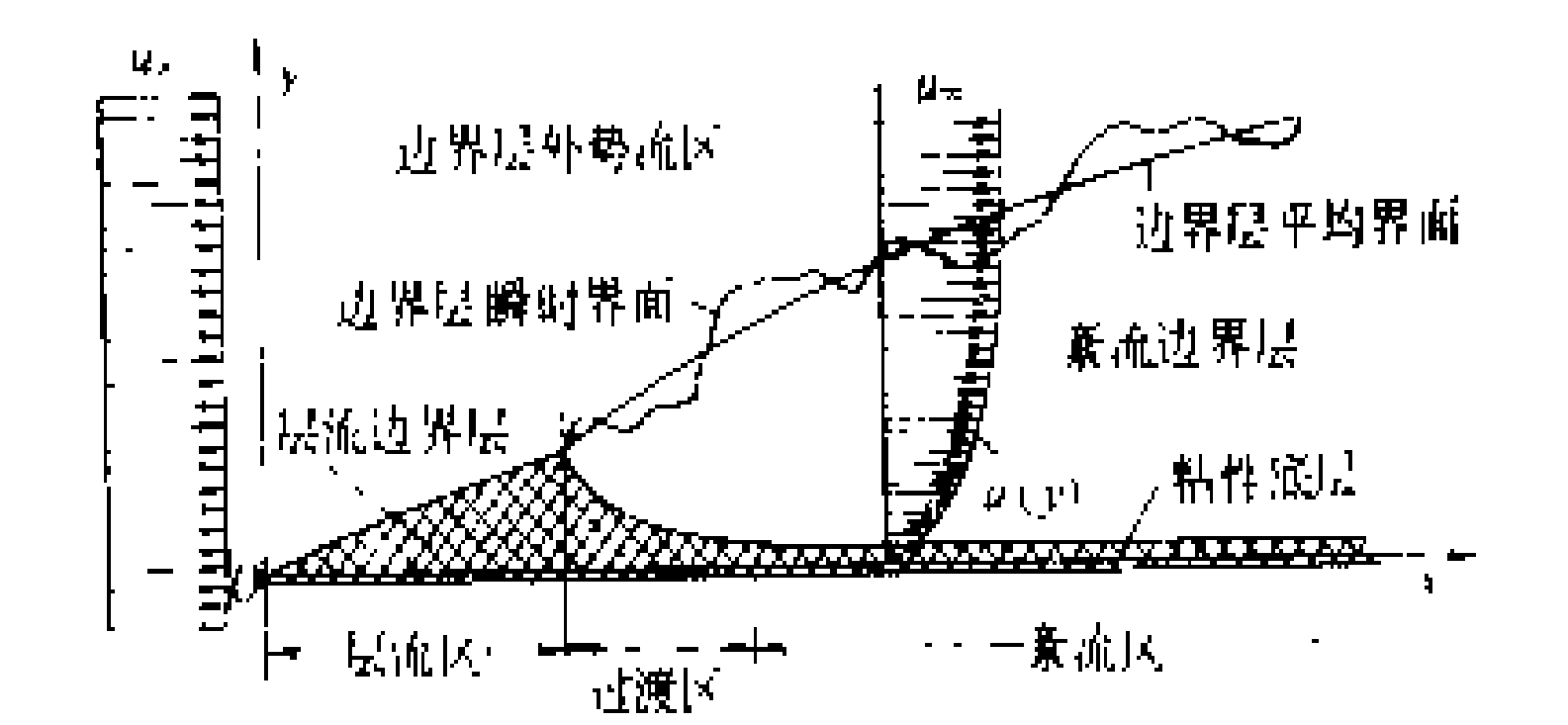
边界层的典型形态，可用平板上边界层的生成、发展为例来说明，如图。距离（ x ）雷诺数 $Re_x = \frac{u_\infty x}{\nu} < 3 \times 10^5$ 范围内，边界层内流动为层流型，称层流边界层；当 $Re_x > 3 \times 10^5$ 以后则转变为紊流边界层，但在平板表面由于粘附作用而存在着粘性底层；在上述二者之间是由层流向紊流的过渡区。

把流场分为近壁边界层和层外流区的概念是 1904 年 L. 普朗特（L. Prandtl）提出的，他从纳维-斯托克斯（Navier-Stokes）方程出发，根据边界层薄而长

的特点，导出二维恒定不可压缩流体的边界层方程组

$$\begin{cases} \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = (\nu + \epsilon_T) \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

式中 \bar{u} 、 \bar{v} 为 x 、 y 方向的时均流速； \bar{p} 为时均压力； ρ 流体密度； $\nu = \mu/\rho$ 为运动粘性系数； ϵ_T 为紊流涡粘性系数。



边界层典型形态示意图

T. V. 卡门（T. Von Karman）进而利用动量原理，通过积分求得了边界层动量积分方程

$$\frac{d\delta_2}{dx} + (2 + H_{12}) \frac{\delta_2}{u_\infty} \times \frac{du_\infty}{dx} = \frac{1}{2} C_f$$

式中 u_∞ 为边界层外流速； $C_f = \frac{2\tau_0(x)}{\rho u_\infty^2}$ 为剪应力系数； $\tau_0(x)$ 为距离 x 处壁面剪应力； $H_{12} = \delta_1/\delta_2$ 为边界层形状参数。

在边界层问题中，用各种定义厚度说明边界层特性，如 δ 为边界层名义厚度，采用 $u(y) = 0.99u_\infty$ 的位置高度

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \int_0^\infty \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right) dy \quad \text{称为边界层位移厚度；} \\ \delta_2 &= \int_0^\infty \frac{u}{u_\infty} \left(1 - \frac{u}{u_\infty}\right) dy \quad \text{称为边界层动量(损失)厚度；} \\ \delta_3 &= \int_0^\infty \frac{u}{u_\infty} \left(1 - \frac{u^2}{u_\infty^2}\right) dy \quad \text{称为边界层能量(损失)厚度。} \end{aligned}$$

当今，边界层理论已发展为流体力学的一个重要分支，广泛应用于航空、船舶、水利水电工程和水力机械等的设计中，为流体力学服务于生产实践开辟了新路。

参考书目

Schlichting H. Boundary-Layer Theory. Translated by Kestin J. Seventh Edition. New York: McGraw-Hill Book Company, 1979

（时启燧）

bianyaqi-xianluzu-jiebian

变压器-线路组接线（transformer-line block

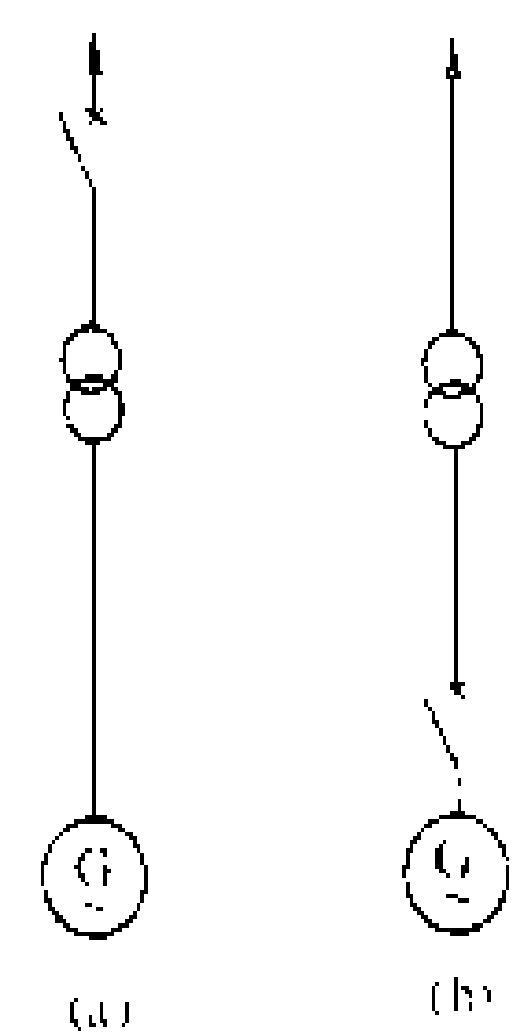


scheme) 变压器和线路串联连接的电路。一般在主变压器高压侧装有断路器,见图(a)。也有高压侧不设断路器的,见图(b),但此时要考虑发电机或主变压器内部故障时能迅速切断对侧断路器。当线路对侧无电源时高压侧不装断路器,只装隔离开关,此时在发电机电压回路中一般要装断路器。当线路对侧有电源时为了节约断路器也可仅装隔离开关和人工接地开关,在发电机或变压器故障时利用人工接地开关快速合闸人为地造成线路接地短路,线路继电保护动作,使对侧断路器断开并停机,以切除发电机或变压器。本接线的优点是:

①接线简单,设备少。②高压配电装置布置简单,占地面积小。缺点是:①线路故障或检修时,主变压器停运。②主变压器故障或检修时,线路停运。

这种接线适用于:①没有近区负荷,将电能集中送至离电站较近的枢纽变电所或距离较近的梯级水电站群联合开关站的大、中容量机组;②只有一台机组一回出线的电站;③电站初期发电时的过渡接线。

(潘天缘)

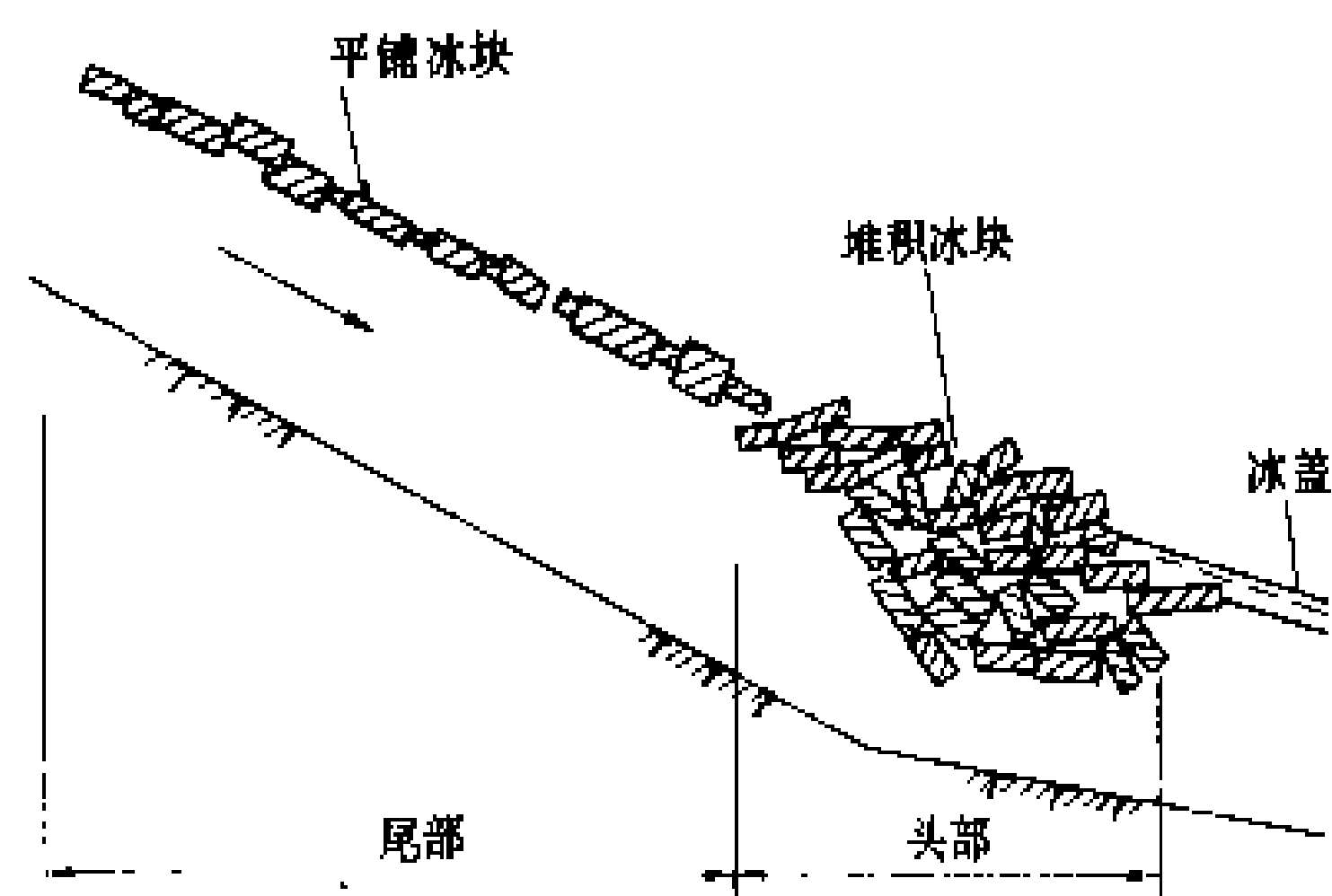


变压器-线路组接线简图

(a) 高压侧设断路器;(b) 高压侧不设断路器

bingba

冰坝 (ice dam) 河流解冻时,由上游流下的大量冰块受阻,形成的冰块堆积体。其外形如图所示。



冰坝示意图

冰坝严重堵塞河道,使上游水位壅高,造成上游城镇及工矿区受淹,或抬高水电站尾水位,减少发电量。当冰坝承受不住上游河段的冰和水压力时即自然溃决,大量流冰突然下泄,撞击沿河两岸建筑物,会造成较大损失。冰坝持续时间较短,一般仅几天。

形成条件 ①动力条件。解冻开河时上游来水量增加,或封冻时河槽蓄水量大,在解冻时下泄并逐段累

积,是形成冰坝的必要条件。②河道形态。游荡性河道及河槽宽、窄、深、浅变化大的河道易形成冰坝。③河流流向。由低纬度向高纬度流动的河流(段),由于上游气温高于下游,上游先于下游开河,则大量冰块受阻于下游冰盖前而形成冰坝。如黄河内蒙古河段和山东利津河段,以及东北的黑龙江上游和松花江下游。

防止措施 概括可分为3类:①利用上游水库调节流量。下游河道封冻前加大泄流量形成较高的冰盖,增加冰盖下过水面积;解冻时减少下泄流量或适时分水,是防止形成冰坝的有效措施。②破冰。一旦冰坝形成,可采用爆破、飞机轰炸、炮轰、破冰船撞击等破冰方法,或撒上融冰。③冰情预报。掌握冰情变化,可及早采取措施,防止形成冰塞、冰坝等。

(杨贵斐)

bingchuan

冰川 (glacier) 分布在陆地上长期存在的、运动状态的巨大天然冰体。

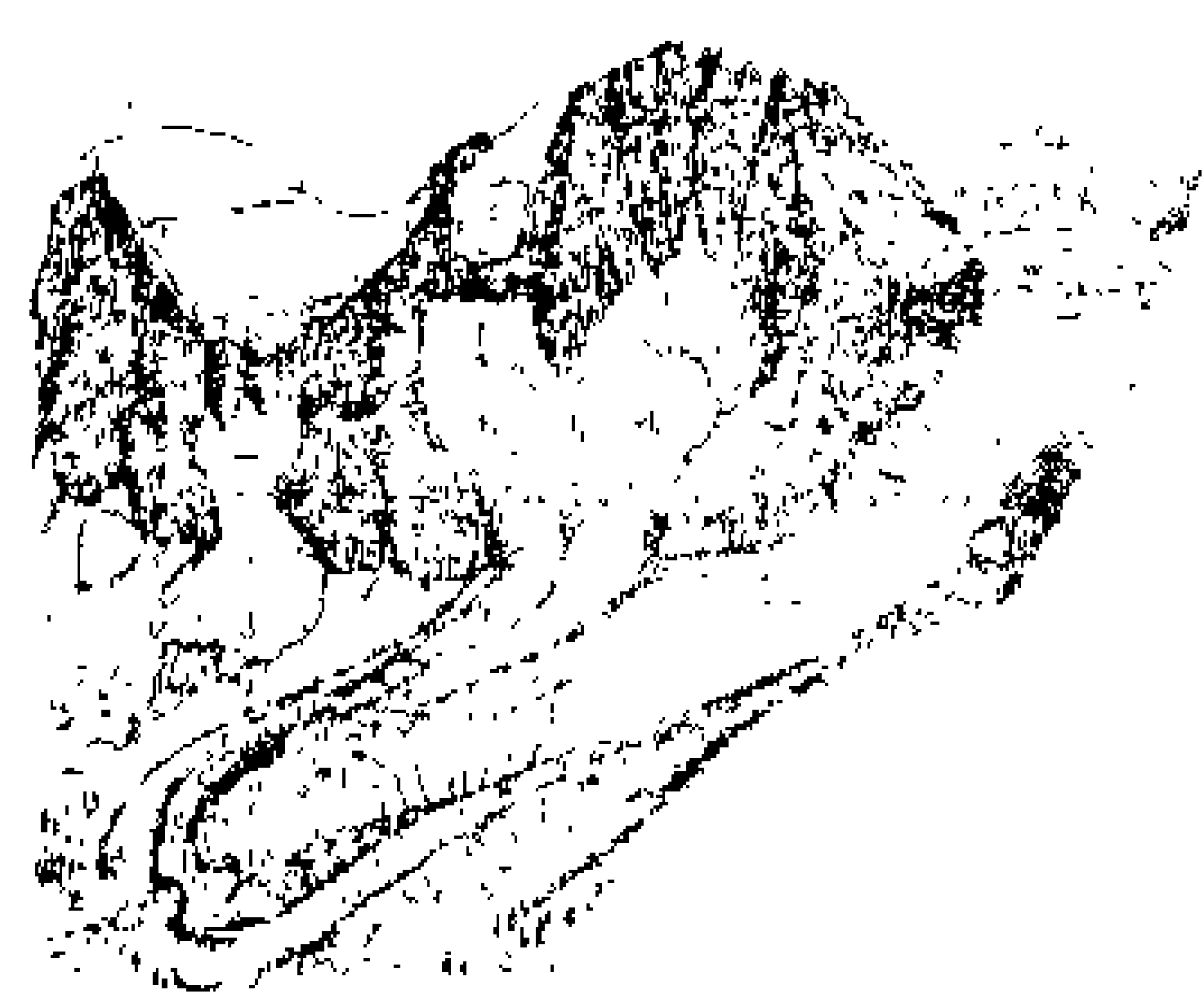
地球上的冰川分两大类,总面积1622.75万 km^2 。一类是分布于高纬度两极地区的大陆冰川,又称冰盖冰川;另一类是分布于中、低纬度高山上的山岳冰川,又称高山冰川。两类冰川规模极为悬殊,地球上冰川面积的97%、冰贮量的99%分布于南极和格陵兰岛,南极冰盖面积达1380万 km^2 ,平均厚度1720~2200m,最大厚度超过4000m,巨大冰盖上漫无边际的冰流掩盖了高山深谷。山岳冰川以亚洲中部高山区最为发育,喀喇昆仑山是中低纬度地区最大冰川作用中心,大冰川触目皆是,分布在山谷中形成复杂的树枝状山谷冰川。

雪线为永久积雪的下限,又称零平衡线。在这个高度,每年降落的雪,刚好在当年融化完。雪线随季节有升降,亦称季节雪线。雪线还随纬度由赤道向两极降低直至海平面。雪线是冰川学上一个重要标志,控制着冰川的发育和分布。雪线以上常年积雪的洼地称粒雪盆,接受降雪和周围山坡的雪崩、冰崩补给,是冰川的积累区;雪线以下的冰舌是冰川的消融区。山岳冰川形态受地形控制,在河谷源头或谷坡凹地的围椅状地形发育的冰川称冰斗冰川,多发育在雪线附近的高程上;悬挂在陡坡上呈盾牌状的冰体称悬冰川;在高山平顶或夷平面上发育的冰川称平顶冰川或冰帽。比冰斗冰川规模大,蜿蜒于山谷底部的冰川称山谷冰川。山谷冰川标志着山岳冰川的成熟阶段,拥有山岳冰川的全部特征(见图),对周围环境起巨大影响,是冰川工作者重点研究对象。

流动是冰川的主要特征,粒雪盆中的冰雪累积到一定厚度,在重力影响下沿谷坡向低处流动,进入消融

bing 冰

区。在缓慢的流动过程中，冰体发生形变出现断裂、褶皱，同时也塑造了地形，形成独特的侵蚀地形如“U”形谷、冰坎等。冰川挟带的碎石、岩块统称冰碛，依据冰碛的分布和堆积形态可以了解冰川发展的过程和趋势。中国现代冰川一般有2~3列冰碛，是16~19世纪小冰期的例证。



山岳冰川略图

- 1 山谷冰川；2—悬冰；3—再生冰川；4 冰帽；5 雪前冰川；6—粒雪盆；7—冰谷；8—弧形连拱；9 冰瀑布；10 横裂隙；11—冰井；12 冰桌；13 冰洞；14—终碛；15—侧碛；16 中碛；17—古冰碛

冰川融水对冰源河流的径流起着调节作用。中国天山、祁连山的山岳冰川融水灌溉千亩良田万顷草原，冰川融水是农牧业的重要水资源。冰川湖泊可发电供水。瑰丽的冰川景观是登山、旅游的好地方，冰川消融及冰湖溃决形成的冰川泥石流和洪水破坏道路、村庄、农田，阻塞河流会给人民生命财产带来损失。研究冰川演变过程可为长期气候变化、水文变化、海面升降提供依据。

中国是世界上山岳冰川最发育的国家之一，广泛分布于喜马拉雅山、昆仑山、横断山、祁连山、天山、东帕米尔、阿尔泰山和青藏高原山地，总面积58651 km²，总贮量51322 亿 m³，年平均融水量563 亿 m³，是长江、黄河、澜沧江、怒江、雅鲁藏布江各大河的水源。中国内流河区分布的冰川属大陆性冰川，约占全国冰川总面积的一半以上，具有降水少、气温低、雪线高、消融弱、运动速度慢的特点。分布在外流河区的冰川属海洋性冰川，具有降水多、气温高、消融强、运动速度快的特点。

(郝绮霞)

bingling

冰凌 (ice) 河道中的静止冰和流动冰的统

称。河流冰凌在热力、动力及河道地形条件的作用下，产生结冰、流冰、封冻、解冻、冰塞和冰坝等现象，称为冰情。

冰凌形态 河流在结冰过程中，由于气温、流速及河道地形边界条件不同，冰凌形态也各异。主要形态有：①冰淤。在水流平缓处漂浮在水面的冰晶，一般多呈针状或松散的片状。②岸冰。沿河岸结成的冰层，一侧固结于岸边，另一侧浮于水面。③冰花。浮于水面或水中的冰淤、棉冰和冰屑等。④水内冰。在水面以下任何部位结成的冰。⑤流冰。随水流流动的冰块或少量冰花。⑥冰盖。覆盖水面的固定冰层。⑦锚冰。冻结在水面以下建筑物或河底的冰。⑧清沟。封冻期河流中未冻结的水沟。⑨冰塞。冰盖下面因大量冰花堆积，阻塞部分过水断面，造成上游水位壅高的现象。⑩冰坝。河流解冻时，由于上游流下的大量冰块受阻形成的冰块堆积体。

冰情演变过程 按照冰的形态变化，可分为结冰、封冻和解冻3个时期。从河流开始结冰日到形成冰盖日为结冰期。从形成冰盖日到冰盖融解日为封冻期。从冰盖融解日到流冰停止日为解冻期。3个时期总称为冰期。中国北方河流所处纬度不同，冰期也长短不一。最北部黑龙江开库康站自10月出现结冰至翌年5月解冻长达200天左右；而黄河郑州站，冰期约40天。

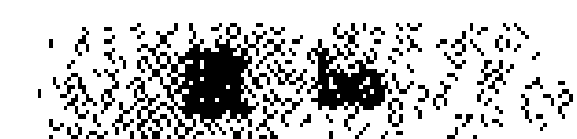
影响冰情的因素 主要有热力、动力及河道特征3个因素。①热力因素。气温下降低于水温时使水体散失热量，当水温降到0℃以下时将结冰。气温上升水体得到热量，当高于0℃时冰将融化。②动力因素。包括水位、流量、流速、风向、风速、波浪等。冬季流冰期，同样的热力条件，如流速大、顺流方向风速高，能推迟封冻；反之则容易封冻。解冻开河时，如流量大、水位上涨快及顺流风力强，常强行开河，造成灾害，称“武开河”；反之则冰盖逐渐融化，形成“文开河”。③河道特征。包括地理位置，河流走向及河道边界条件。同样热力、动力条件，各河流的封冻时间不同。解冻时，在弯道及滩地较多的河段，容易形成冰坝。

在水电站的规划、设计、施工及运行中，需考虑冰凌的危害，制定相应措施。主要问题有冰坝、冰塞对水电站施工及运行的威胁，冰压力对水工建筑物的影响，冰花堵塞水电站进水口拦污栅等。

(杨贵斐)

bingqing guance

冰情观测 (ice regime observation) 对江河、湖泊、水库等自然发生的冰情及其变化过程进行观察、测量和记录。冰情资料对各种水工建筑物的设计、施工、运行管理及防御江河凌汛都有重要作用。冰情观



测的基本内容是冰情目测、固定冰厚测量、冰流量测验和水内冰观测。

冰情目测 为了系统地了解冰情变化过程，一般在水文测站附近选择有代表性的河段，在整个结冰期，按适当频次用目测或望远镜测记各种冰情现象。主要冰情现象有：开始结冰、岸冰、流冰花、流冰、水内冰、冰盖、封冻、锚冰（冻结在河底或水下建筑物上的冰）、清沟（封冻期河流中未结冰的水沟）、冰塞（冰盖下大量冰花堆积，阻塞水流）、冰坝（横跨河流断面并明显壅高水位的冰块堆积体）、岸边融冰、冰滑动、解冻等。冰情复杂不易用文字记录者，可用规定符号绘制平面草图，必要时可以作冰情摄影。

固定冰厚测量 目的是系统地收集封冻冰层厚度变化过程资料。测量冰厚的地点，与清沟、岸边、浅滩及河上冬季道路应有足够距离，没有泉水流入或污水排泄的影响。测量时，用冰穿、冰钻等工具先开凿冰孔，用量冰尺测量冰厚、水浸冰厚（冰层凿孔所量得的自由水面至冰底面距离）。有冰花及冰上有雪时，要同时测冰花厚及冰上雪深。测量次数以能掌握冰厚度变化过程为准，一般水体封冻后开始，至解冻时停止，每1~5日测一次。

冰流量测验 单位时间内通过测验断面的冰块体积或冰花的折实体积称为冰流量。实测冰流量河段要求河道顺直，水流平稳，河宽及岸冰间敞露水面宽大体一致。测量内容包括敞露水面宽、流冰或流冰花的疏密度（流冰或流冰花面积与敞露水面面积的比值）、冰块或冰花团的流速与厚度、冰花的密度等。根据测得资料计算冰流量。以每次实测冰流量与相应疏密度建立关系曲线，用连续观测的疏密度推算冰流量变化过程及重量。

水内冰观测 对水面以下任何部位存在的冰量进行测量。水内冰数量通常以一日或数日内冻结在水下标准形状铁丝网上冰的重量表示，可将铁丝网放入预定位置，定时取出测量。

（李久昌）

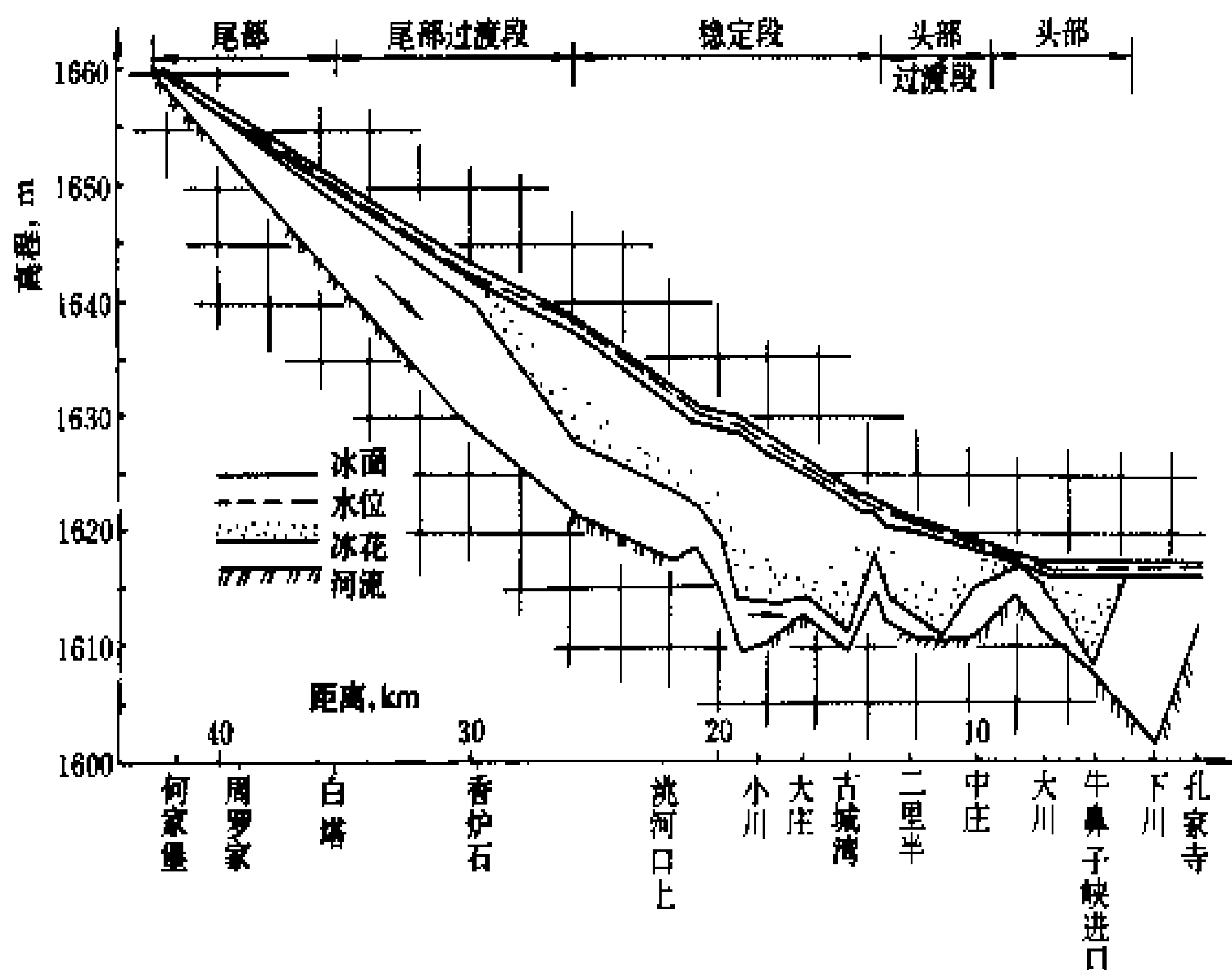
bingsai

冰塞（ice jam） 河流封冻初期，在冰盖下因大量冰花冰块堵塞部分过水面积，造成上游水位壅高的现象。示意如图。

冰塞的形成需具备条件为：①有足够的来冰量，是

形成冰塞的必要条件。上游必须是未封冻的河段，水流才能与寒冷的大气进行热交换，产生大量冰花及冰块。

②河道地形条件。冰塞一般发生在水流不畅，比降突然变缓的河段，如急弯及狭窄的河段或水库回水末端。③封冻冰盖前缘处的流速需大到某临界值，流冰及冰花



冰塞体部位

才能潜入冰盖以下。该临界流速常用弗劳德（Froud）数判别

$$Fr = V / \sqrt{gH}$$

式中 Fr 为弗劳德数； V 为冰盖前缘的平均流速； g 为重力加速度； H 为平均水深。根据黄河盐锅峡水库回水末端产生冰塞的实测资料分析， $Fr \geq 0.09$ 时，冰花潜入冰盖下形成冰塞；当 $Fr < 0.09$ 时，冰花难于下潜，而在冰盖前缘平铺，使冰盖向上游发展。

中国黄河上游刘家峡河段，于1961年冬盐锅峡水库建成蓄水后，至1967年刘家峡水库建成前，连续5个冰期发生严重的冰塞壅水现象。冰塞壅水位较冬季平均水位高9 m，冰花最大堆积厚10余 m，造成刘家峡大坝基坑及主要公路被淹。

（杨贵斐）

bolang

波浪（water wave） 液体自由表面受外力扰动而产生的周期性起伏振动现象，亦称液体自由表面波。波浪是一种常见的水面波动现象，其特征是水体质点作周期性振动，并由于水的粘性而向外传播。波浪运动携带着能量，常冲击堤防、库岸、码头，导致建筑物坍塌、破坏。近年来，人们致力于研究利用波浪能作为新能源。

液面波浪运动因主要作用力的不同而分为重力波



和表面张力波两类。后者较少见,如风力较小时水面出现的涟波(波长小于3 cm,周期小于0.1 s)。日常所见的波浪运动多是重力波,按其扰动源的不同分为两类:一类是扰动加于自由表面而形成的波动,如风生波、船行波、击水波等;另一类是扰动来自液体内部而形成的波动,如地震波、潜艇或水下爆炸涌起的水面波动。此外,广义的波浪运动还包括由太阳、月球引力而引起的潮汐等。

重力波的学科分类按其运动特性划分为:小振幅(微)波与有限振幅波;深水波(短波)与浅水波(长波);推进波与驻波;自由波(余波)与强迫波等。

水利水电工程中的波浪问题主要有:水库风生波、库岸坍塌激起的涌波、枢纽泄洪或电站机组改变负荷时在下游河道形成的涌波、船舶航行在水库或河道中形成的船行波等。

波浪运动的要素是:水深 H ,波长 λ ,波高 h ,周期 τ ,波速 c ;还有:波幅 $a=h/2$,波数 $R=2\pi/\lambda$,频率 $f=1/\tau$ 等。常见的自由表面重力推进波,按水深与波长之比分为

深水波(短波) $H/\lambda \geq 1/2$

浅水波(长波) $H/\lambda < 1/20$

中水波 $1/2 > H/\lambda \geq 1/20$

深水波与浅水波的波形和运动特性有明显的差异:深水波波峰较为平坦,而浅水波波峰较为陡峻;深水波波面附近水质点运动轨迹近似为圆周运动,在水面以下约一倍波长处,水质点已几乎不动,具有明显的表面性,而浅水波波面附近水质点呈椭圆状轨迹运动,直至水底质点运动轨迹退化为椭圆两焦点间的一段平线,整个水域的水质点都在动。

表述自由表面重力推进波的理论有:

(1) 势波理论——深水小振幅波;

(2) 圆余摆线理论——深水有限振幅波;

(3) 椭圆余摆线理论——浅水有限振幅波;

(4) 随机波理论——海洋、湖泊、水库中的风生波,因水面以上气流因素的随机性,而生成随机波。

参考书目

Dean R. G., Dalrymple R. A. Water Wave, Mechanics for Engineers and Scientists. New York: Prentice-Hall, Inc. 1984

(时启燧)

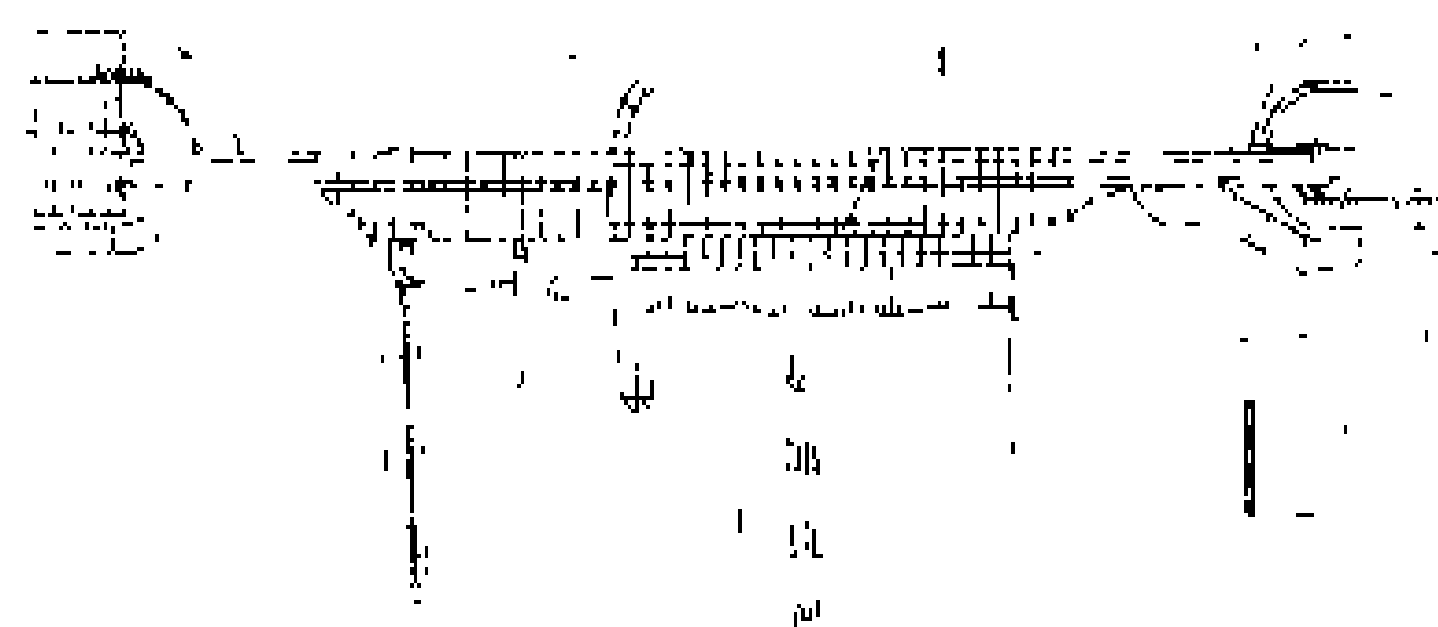
Bratsk Skhidnizhan

布拉茨克水电站 (Bratsk Hydropower Station) 位于苏联西伯利亚叶尼塞河支流安加拉河上。初期总装机容量4500 MW,远景5000 MW。多年平均年发电量226亿kW·h。电站以500 kV超高压

输电线路与西伯利亚联合电力系统连接,主要向伊尔库茨克和布拉茨克地区供电。电站除发电外,还有航运、供水等综合效益。主坝为宽缝重力坝,最大坝高125 m。工程于1955年开始施工准备,1957年1月导流工程开工,1958年开始浇筑大坝混凝土,1959年截流,1961年第一台机组发电,1966年初期18台机组全部投入运行。

水文和水库特性 电站位于贝加尔湖下游,天然径流经湖泊调节,较稳定。坝址以上流域面积69.2万km²,多年平均年径流量917亿m³,正常蓄水位402 m,相应库容1690亿m³,水库面积5500 km²,回水长度565 km。水库调节库容482亿m³,调节系数 β_1 为0.53,可进行多年调节。水库淹没林地35.7万ha,草场16.6万ha。电站按万年一遇洪水设计,设计洪水流量11930 m³/s。水电站设计水头99.7 m,最大水头106 m,最小水头92 m。最高尾水位299.2 m,最低尾水位296.0 m。

枢纽布置 见图。坝址基岩为坚实的辉绿岩。枢纽



布拉茨克水电站平面布置图

1—右岸土坝; 2 混凝土宽缝重力坝; 3 溢流坝; 4 发电厂房; 5—左岸主坝; 6 屋外开关站

由混凝土宽缝重力坝、坝后式厂房和左右岸土坝等组成。宽缝重力坝,坝高125 m,顶长1430 m,缝宽7 m。左右岸土坝分别长723 m和2987 m。混凝土坝河床部分长924 m,分成42个坝段,每段长22 m。溢流坝位于右侧,占11个坝段,设10个孔口尺寸为18 m×16 m的溢流孔,泄流能力为7090 m³/s。厂房坝段位于河床中部及左侧,占20个坝段,总长440 m。每个坝段内设有进水口及压力输水侧管。厂房位于坝后,包括安装场总长515 m,内有20个机组段。初期18台机组,单机容量初为225 MW,70年代更换发电机绕组,单机容量增至250 MW。混流式水轮机,转轮直径5.5 m,额定水头100 m,设计流量254 m³/s,转速125 r/min;发电机额定功率250 MW,额定电压15.75 kV,额定功率因数0.85。主变压器布置在坝和坝后厂房之间的平台上。屋外开关站设在左岸。变压器和开关站之间用220 kV充油电缆和500 kV架空线路连接。开关站220 kV出线6回、500 kV出线4回。

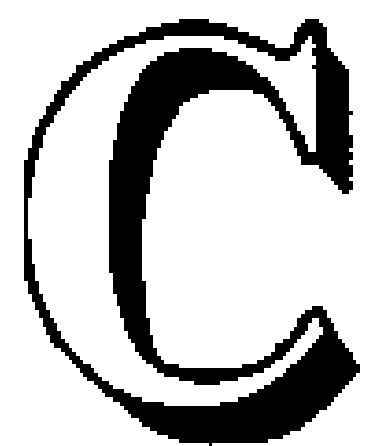
提前发电措施 1961年9月水库开始蓄水。同年

11 月，第一台机组投入运行。为提前发电，第一台机组进水口高程比其它机组进水口高程低 25 m。投产时靠坝体临时断面挡水，上游柱块达到所需浇筑高度，下游侧各柱块依次降低，坝体临时断面下游面保持 1：0.8 平均坡度。第一台机组发电时，大坝混凝土工程量只完成了 60%，厂房混凝土工程量只完成了 77%，右

岸土坝尚未动工。

工程量和造价 混凝土浇筑 485.8 万 m³（其中坝体混凝土 437 万 m³），土石方开挖 380.5 万 m³，土石方回填 1249.2 万 m³，金属结构和机械设备安装 38770 t。工程总造价 7.89 亿卢布。

（高义生）



cailiao lixue

材料力学 (strength of materials) 固体力学的一个分支,是研究物体在载荷作用下的材料特性,以及所承受的外载荷和内抗力与相应变形之间关系的学科。其研究对象是由工程结构或机械零件简化而得到的一维或二维物体(也称为杆件或板壳)。作用于杆件或板壳上的力或力偶称为载荷,它包括集中载荷和分布载荷,前者有集中力和集中弯矩,后者有线载荷、面载荷和体积力等。不随时间而变化的载荷称为静载荷;随时间而变化的载荷称为动载荷,如冲击载荷、循环载荷等。自1638年G.伽利略(G. Galileo)研究悬臂梁的强度开始,就有了材料力学的雏形。随后胡克(R. Hooke)定律、C. -L. -M. -H. 纳维(C. -L. -M. -H. Navier)的平截面假设、L. 欧拉(L. Euler)的长柱公式、O. 莫尔(O. Mohr)的应力圆、卡氏(A. Castigliano)定理等重要成果相继提出,使材料力学不断发展完善,用于解决许多工程实践中的力学问题,并成为结构力学等学科及工程设计的基础。

研究内容 材料力学是一门试验与理论分析相结合的学科,其研究内容主要包括材料力学性能研究及杆件或壳体的力学分析两大部分。

(1)材料力学性能研究。通过试验,研究材料在不同载荷条件下的变形和内力变化过程及其规律性,并测定弹性模量、泊松比、屈服应力、抗拉强度、抗压强度、疲劳、徐变等材料性质参数,作为理论分析之用。

(2)杆件或壳体的力学分析。运用静力学的平衡条件,并假定材料是均匀连续的弹性体和变形时满足平截面假设,可以由简明的数学推导得出相当精确的公式,求出物体的应力、应变和位移,包括杆件的拉压、梁的弯曲、轴的扭转等基本情况的分析和桁架、刚架等复杂系统的分析。有时还涉及其他复杂因素引起的问题,如曲梁的弯曲、弹性地基上的梁、组合断面的梁、钢筋混凝土梁、平板和无矩壳体、长柱的临界压力、超静定系统分析、非圆截面轴的扭转、薄壁结构的计算以及动载荷和温度载荷作用下的有关问题。

研究任务 有以下两个方面。

(1)对已知尺寸和材料的构件进行力学分析,以确定其在无过量变形、失稳或断裂情况下抵抗指定载荷的能力。即研究构件在满足刚度和稳定条件时抵抗指定载荷的能力。

(2)选择适当材料,并确定构件形状与尺寸,以实现其在已知或预估载荷下的预定功能,以便设计出既经济又安全的结构或零件。

参考书目

[美]铁摩辛柯S,盖尔J著.材料力学.胡人礼译.
北京:科学出版社,1978

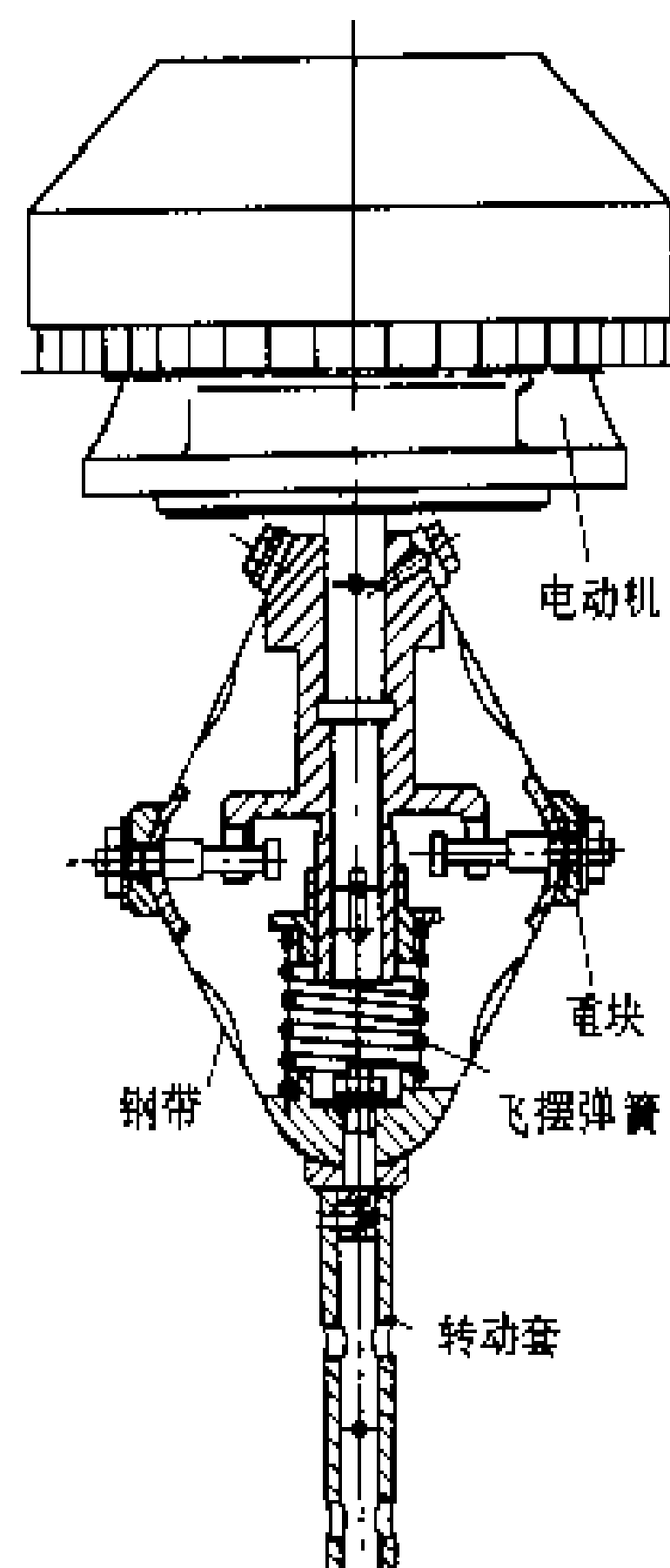
(Timoshenko S, Gere J. Mechanics of Materials.
New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1972)

(范元勋)

cesu zhuangzhi

测速装置 (speed measuring device) 水轮机调速器内测量水轮机实际转速与额定转速偏差量的器件。常用的有离心飞摆测频、LC回路测频、脉冲频率测频和数字测频4种装置。

离心飞摆测频装置 利用离心运动的原理制成,是机械液压型调速器的测速元件。按飞摆的结构类型分,有单臂重锤式、板簧式和菱形钢带式。目前采用最多的是菱形钢带式,见图1。菱形钢带式飞摆由电动机、重块、飞摆弹簧、钢带和转动套等部件构成。



电动机由与水轮发电机同轴的永磁发电机驱动,其转速与机组转速成正比。电动机通过钢带带动重块和转动套一起转动。机组为额定转速时,重块所产生的离心力与飞摆弹簧的弹力和部件的重力平衡使转动套处于一个稳定的位置。机组转速升高,电动机的转速随之升高,离心力增大,转动套上移;反之,机组转速下降,离心力减小,转动套下移。离心飞摆的输出是转动套的位移。

图1 菱形钢带式飞摆

LC回路测频装置 利用电感(L)电容(C)谐振回路的复阻抗与频率有关的特性做成的电气液压型调速器的测速器件。常用的串、并联LC测频回路图如图

2 所示。测频回路的输入信号为永磁发电机输出的交流电压，经变压器降压后以两组电压分别加于串联谐振回路 L1C1 和并联谐振回路 L2C2。测频回路的输出

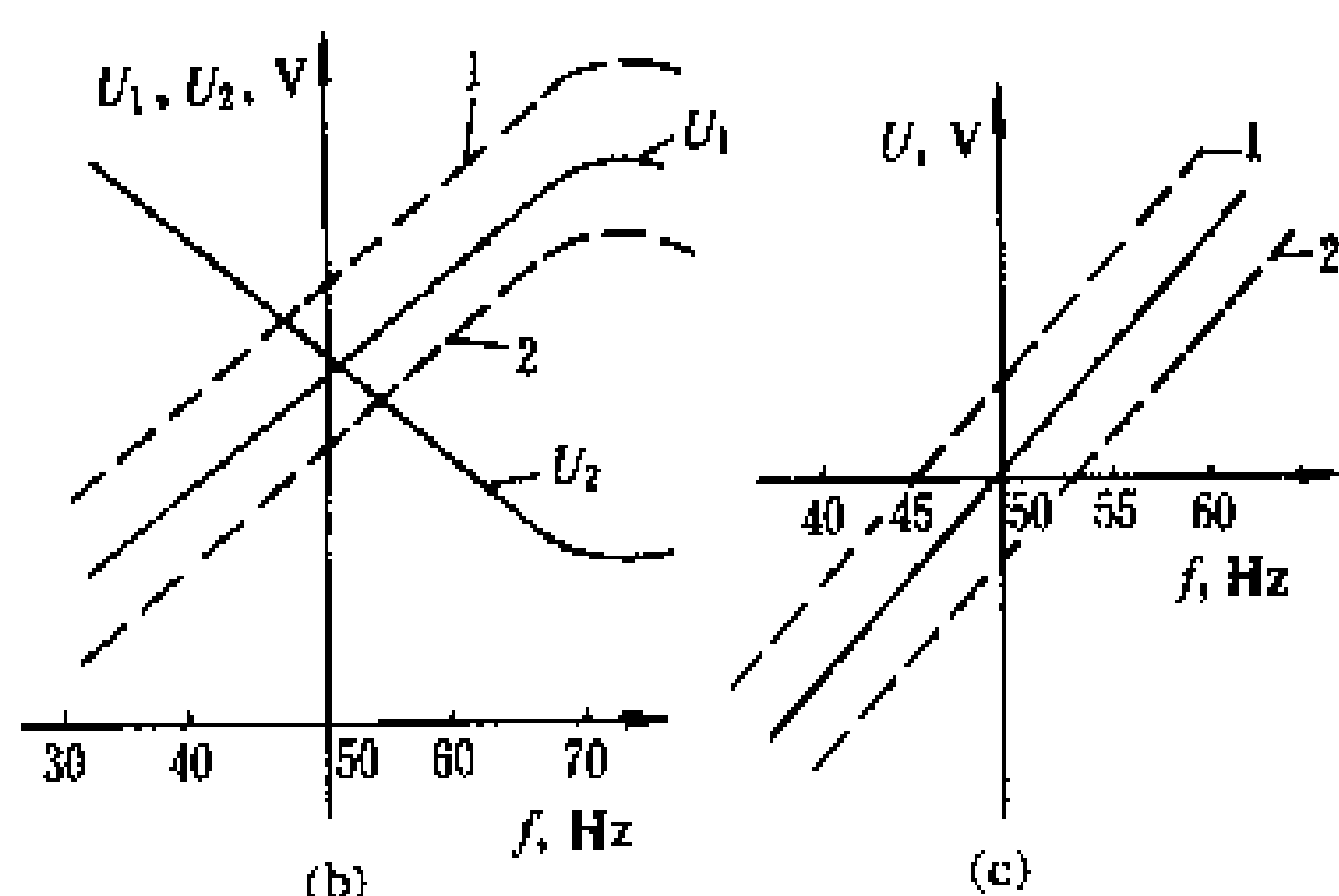
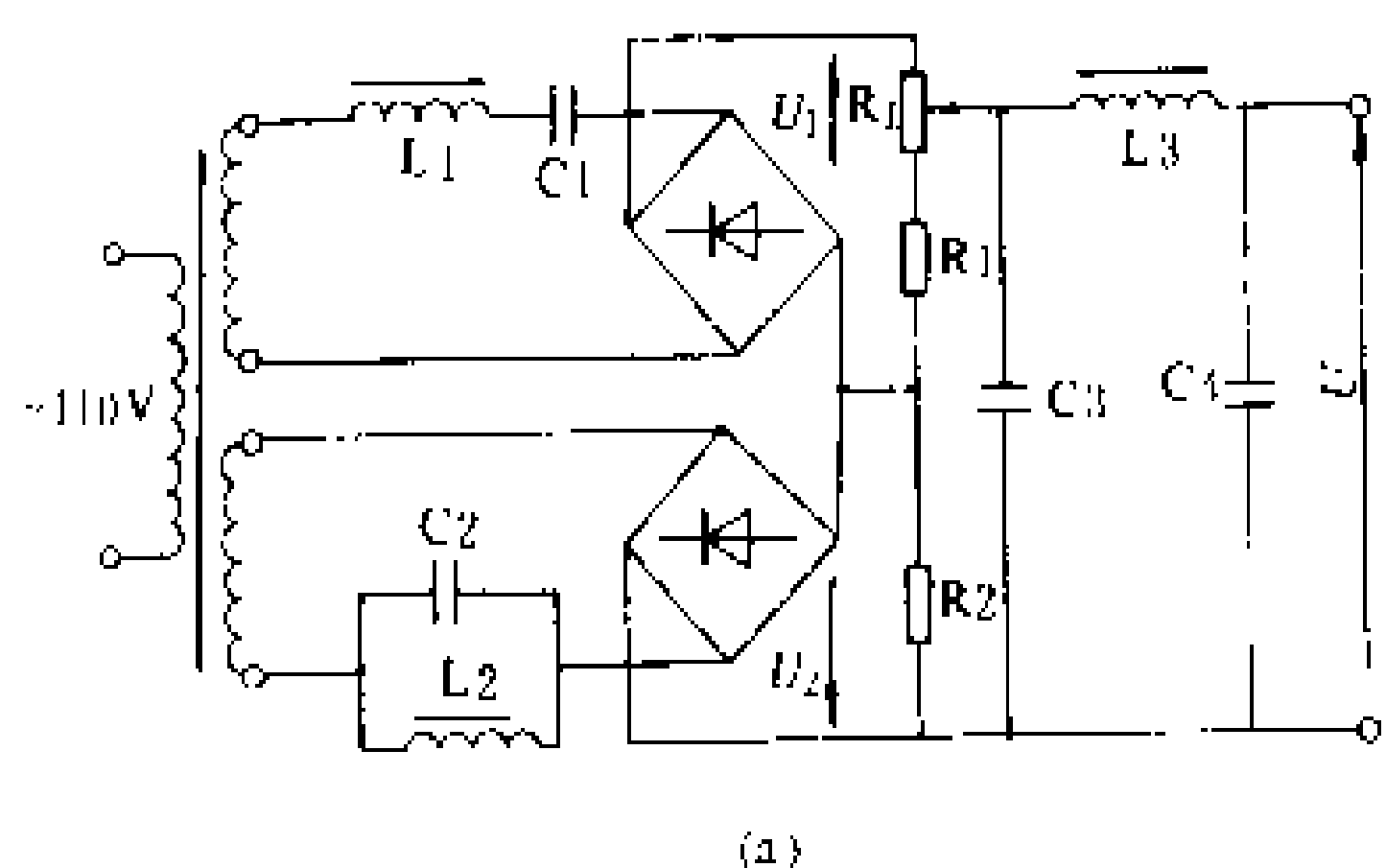


图 2 串、并联 LC 测频回路图

(a) 测频回路图；(b) 串联和并联谐振回路输出电压与频率的关系曲线；(c) 测频回路输出电压与频率的关系曲线
曲线 1— R_1 在上限位置时；曲线 2— R_1 在下限位置时

是串联谐振回路输出电压与并联谐振回路输出电压整流后的电压差。选择这两个回路的谐振频率在 70~80 Hz 之间。输入信号频率等于谐振频率时，串联谐振回路复阻抗及其上的压降均最小，输出 (U_1) 最大。输入信号频率偏离谐振频率，串联谐振回路复阻抗及其上的压降均增大，输出减小。在输入信号频率等于谐振频率时，并联谐振回路的复阻抗及其上的压降均最大，输出增大。调整电位器 R_1 可得额定频率时，测频回路输出信号电压 U ($U=U_1-U_2$) 为零，高于此频率时输出电压为正，低于此频率时输出电压为负。LC 测频回路还可以采用并联、双并联或串联 LC 回路组成。

脉冲频率测频装置 利用电子电路将水轮机的转速信号转换成与其成比例的电压信号的器件。转速信号可以取自发电机机端电压互感器，也可以取自齿盘与磁头，通过整形、放大和脉冲频率-电压转换等电路将转速信号变换成规则的与水轮机转速成比例的方波脉冲数或脉冲时间宽度，经放大后将脉冲信号转换为与水轮机转速成比例的电压输出信号。

数字测频装置 用数字电路构成的电气液压型调速器测速器件。它是用转速信号的周期时间来控制一个计数门，让其正半周内将频率恒定且频率较高的矩

形脉冲进入计数器。当转速变化时，其周期也随之变化，从而使得通过计数门进入计数器的矩形脉冲数也发生变化。最后经寄存器和数模转换器将脉冲数转换成与转速成比例的模拟电压量输出。

(张学中)

cengliu

层流 (laminar flow) 粘性流体低速流动时质点层次分明的流动形态。层流状态下，流体粘性对层流运动起着主导作用，流场内层间物质既不相相互穿越，亦不相相互掺混。如：流场固体边壁附近的层流边界层、紊流边界层内紧贴边壁的粘性底层、平行两壁面狭缝间的泊肃叶 (J. - L. - M. Poiseuille) 流动、微细颗粒在粘性液体中自由沉降的斯托克斯 (G. G. Stokes) 流动、滴灌设备中的毛细管水流、多孔介质中的渗流、机械润滑油流动等。1883 年 O. 雷诺 (O. Reynolds) 通过管道水流试验首先揭示出层流和紊流是实际流体运动的两种基本形态，并以雷诺数 $Re = \rho v d / \mu$ 作为流态判别准则 (其中： ρ 为流体密度； μ 为流体动力粘性系数； v 为流动速度； d 为管道直径)。在圆管流动中，保持稳定层流运动的下临界雷诺数为 $Re = 2320$ ，而上临界雷诺数受外来扰动影响没有定值，有时 Re 达 12000。

层流运动的阻力系数 λ 仅是雷诺数的函数，圆管试验给出 $\lambda = 64 / Re$ (见水流阻力)，其水力损失与流速的一次方成正比。层流运动的内剪力 τ 远小于紊流状态时的剪应力，一般由牛顿内摩擦定律表示

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

有些液体流动的剪应力不满足牛顿定律，称为非牛顿流体。

表征层流运动的基本方程是纳维-斯托克斯 (Navier - Stokes) 运动方程和连续方程

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \Delta \mathbf{V} \quad (2)$$

$$\text{div} \mathbf{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

式中 \mathbf{V} ， \mathbf{F} 分别为由向量表示的流速向量和单位质量力； u ， v ， w 分别表示坐标 x ， y ， z 方向的流速分量； ρ 为流体密度； $\nabla p = \text{grad} p$ 为压强梯度； $\frac{\mu}{\rho} \Delta \mathbf{V}$ 项表示粘性阻力。

一些典型初边值条件下的层流运动，可直接求解纳维-斯托克斯运动方程，得到精确解、近似解或数值解。结果给出层流近壁流速分布为抛物线型。

(时启燧)



chaguan

岔管 (bifurcated pipe) 压力管道由一根分为两根或多根时的连接管段。当水电站采用一条主压力管道为多台机组引水的布置时,岔管是压力管道的重要组成部分,其特点是结构复杂、水头损失比较集中和靠近厂房。在岔管段,由于主管和支管的管壁相互切割,管壁已不再呈完整的圆形,在内水压力或外水压力的作用下产生较大的不平衡力,需增设加固构件或改善、加强管壳结构。

类型 岔管按形状分有“Y”形、“卜”形和三岔3种(见图1)。按所处环境分有露天式和埋藏式。按结

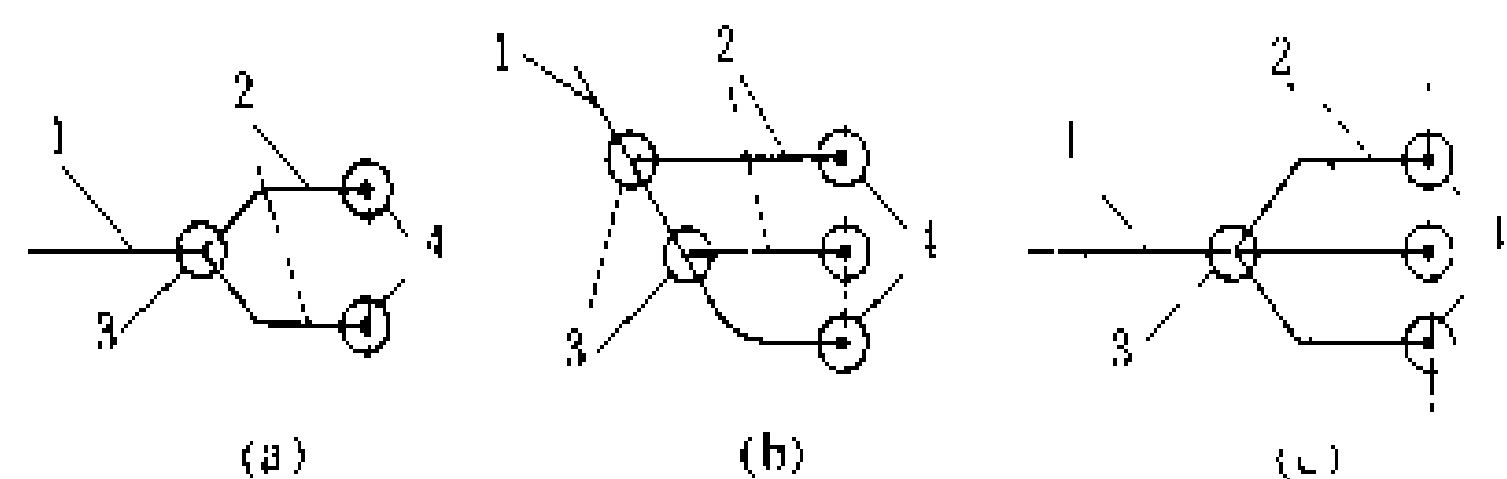


图1 岔管布置简图

(a) “Y”形; (b) “卜”形; (c) 三岔

1—主管; 2—支管; 3 岔管; 4 水轮机

构型式分有三梁岔管、月牙肋岔管、球形岔管、无梁岔管等型式。“Y”形岔管具有流量分配对称、均匀的优点,多用于一条压力管道为两台机组引水的布置;“卜”形岔管多用于一条压力管道为多台机组引水的布置;三岔岔管可用于“一管三机”的布置。露天式岔管多为钢岔管;小型工程的低水头岔管也有采用钢筋混凝土岔管的。水电站埋藏式岔管主要为压力洞内的岔管,多采用钢岔管回填钢筋混凝土与围岩联合受力的型式;当山体雄厚、各向地应力均比内水压力大,围岩透水性弱、围岩强度能够承受内水压力时,可采用钢筋混凝土衬砌的岔管。

三梁岔管 在岔管管壳外面用一根“U”形梁和两根腰梁加固的岔管(见图2)。这种岔管结构复杂,耗用钢材多,当岔管尺寸较大、水头较高时焊接、退火和

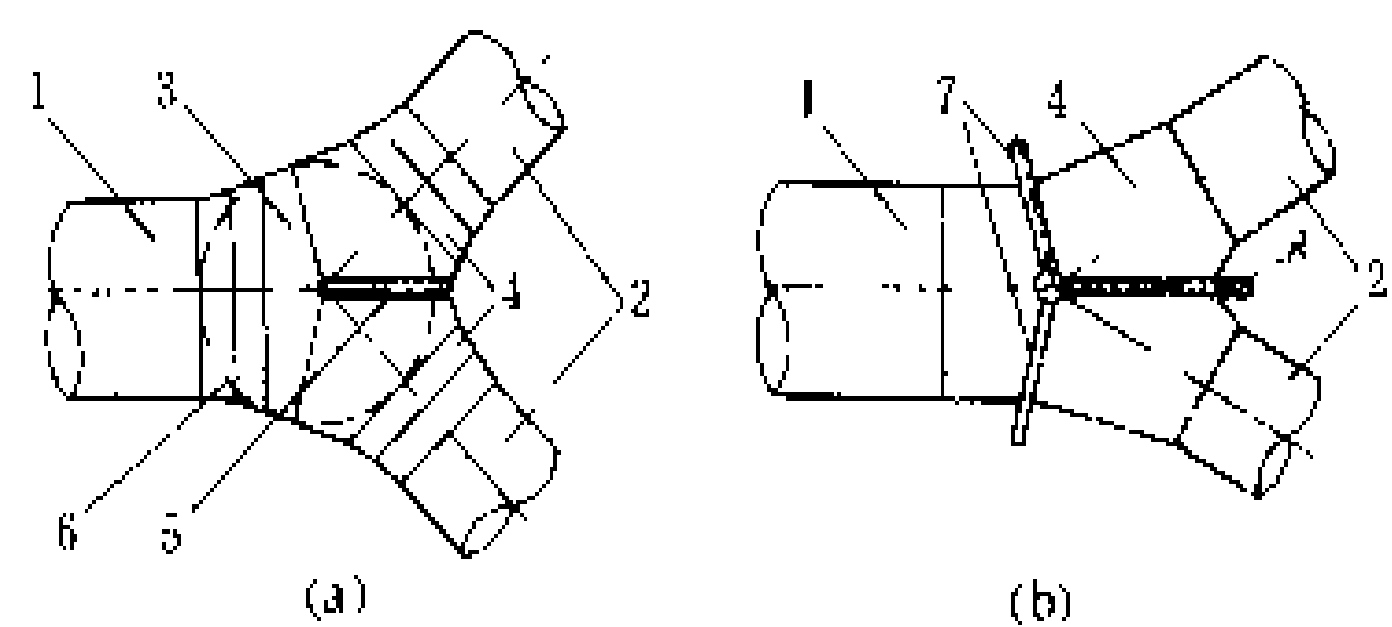


图2 月牙肋和三梁岔管

(a) 月牙肋岔管; (b) 三梁岔管

1—主管; 2—支管; 3 主锥管; 4 支锥管; 5—月牙肋; 6 公切球; 7—腰梁; 8—“U”形梁

运输困难,自20世纪60年代以后多为月牙肋岔管所取代。

月牙肋岔管 在岔管分岔处用一个完全嵌入管壳内的月牙形肋板加固的岔管。主管和两根支管做成锥形,并与公切球相切(见图2)。这种岔管结构受力条件好,节省钢材用量。

球形岔管 由球壳、主、支管、补强板和管内导流板组成的岔管。球壳的半径一般为主管半径的1.3~1.6倍。当水头高、管径较小时适于采用球形岔管。

无梁岔管 用球壳片与渐变的锥管将主、支管相连的岔管。

(郑顺炜)

chanhuoliao

掺和料 (admixture) 混凝土中掺入的磨细矿物材料或粉状工业废料。它是水泥的辅助材料或混凝土的填充料,可以改善混凝土性能,提高混凝土质量并节约水泥。它可以在水泥工厂粉磨水泥时掺入,如水利水电工程中广泛使用的矿渣硅酸盐水泥和火山灰质硅酸盐水泥等,就是用矿渣、火山灰、石灰石等配制的。它也可在现场拌制混凝土时掺入。

掺和料的分类 分活性与非活性两类。活性掺和料水化后本身不能硬化或硬化很微弱,但可与水泥中析出的氧化钙作用,能加速混凝土凝结硬化并提高强度,粒化高炉矿渣、火山灰质材料和粉煤灰、凝灰岩、硅藻土等都属这一类。非活性掺和料,基本上不与水泥发生化学反应,如石灰石、粘土等。

使用掺和料的目的 ①在粉磨水泥时掺入磨细矿物等掺和料,可大量减少水泥中的熟料量,扩大了水泥料源,降低水泥价格。②使用掺和料能改善水泥性能,增加混凝土拌合物的和易性,增加内聚力,减少离析,减少用水量和水泥用量,从而降低了混凝土的水泥水化热温升,对防止混凝土温度裂缝十分有利。③混凝土中砂粒之间的空隙是靠水泥浆液填充的,掺和料能替代一部分水泥浆液的体积,减少混凝土的用水量,相应降低了混凝土的水灰比,使混凝土的密实性和抗渗性显著提高。活性及微活性的掺和料是节约水泥,特别是节约高标号水泥的重要途径。④火山灰质掺和料能加强混凝土在硫酸盐质水中的抗化学侵蚀性,提高混凝土抵抗浸析作用的抗水性,能抑制碱-活性骨料反应(见混凝土骨料),防止混凝土开裂。

质量要求 各种掺和料的料源选择、开采、加工、运输、保管、检验以及掺用工艺等都应符合质量要求,其中最基本的是材料自身质量及其掺量。主要有以下几方面:①活性水硬性掺和料的活性指标,是以1g掺和料的氧化钙(CaO)吸收量(mg)表示,分为高活

性、中活性和低活性 3 级。使用时应做材料试验鉴定。
②磨细度一般与所用水泥的细度相同。
③对混凝土有害的有机杂质,其烧失量不得大于规定的限值。
④掺和料中的硫酸和亚硫酸化合物的含量,换算成三氧化硫(SO₃)不应超过规定的限值。
⑤非活性掺和料代替混凝土中的水泥量应按混凝土设计要求规定的限值,其 28 天龄期的混凝土抗压强度降低的百分数不应超过限定值。
⑥非活性掺和料的掺量,应根据混凝土设计要求,限定需水量增加的百分数和坍落度减少的百分数。

掺和料的使用 掺和料使用的原则是质量合格,性能适应,使用方便,成本较低等。掺用部位及最优掺量应通过试验决定。现在世界上有些国家主张在现场掺粉煤灰。粉煤灰是火电厂燃烧煤粉由烟道中排出的废弃粉末。其活性好,功能高,资源丰富,使用方便,是效益较优的一种掺和料。粒化高炉矿渣加工困难、资源较紧缺,多数是在水泥工厂生产水泥时掺入。粘土类非活性掺和料存在需水量高、强度低、干缩量大等缺点,在水工混凝土和钢筋混凝土中较少掺用。然而它的料源最广、价格较低,所以在要求低的或临时性工程中使用是适宜的。

(章景安)

chanqi shuihu

掺气水流 (aerated flow) 高速水流与空气接触的界面,因水质点的紊动而导致气水两相掺混的现象。掺气水流属气液两相流。掺气后的水流在外观上呈白色泡沫或棉絮状,气水界面粗化,气相以气泡或气囊的形态掺入水中,水相则以跃移水团的形式扩散到周围空气中,但是,两相流体交互掺混的范围一般只限于界面附近,所以水流掺气具有表面成层流的特点。

水流掺气与水中含气是两种不同的概念,水中含气指溶解于水中,人眼看不到的各种空气分子,即使水体静止,含气量亦不会有大变化,水中含气量总是小于当地水的饱和含气量;水流掺气则指由于水流紊动而挟持的浮游气泡,人眼可见,水流一旦停止流动,气泡即从水中逸出,运动水流的掺气浓度总是大于水的饱和含气量。

水流掺气类型 高水头泄水建筑物中的水流掺气现象主要有明渠水流掺气、射流掺气与雾化两种类型。

(1)明渠水流掺气。主要是确定水流掺气后的“水深”,用于估算溢流坝、陡坡明渠、明流隧洞设计中的边墙超高。大量的原体观测资料为估算掺气水深 h_c 提供了许多经验公式,一般都是以水流不掺气时的水力因素(即假定水流不掺气时的清水水深 h_1 , m;水力半径 R_1 , m;断面平均流速 V_1 , m/s)组成参数来表征掺

气后的有关各量。其中,包含因素比较全面,具有代表性的明渠掺气水深关系式为

$$\beta = \frac{h_1}{h_c} = A \left(\frac{V_1^2}{gR_1} \times \frac{n \sqrt{g}}{R_1^{1/6}} \times \frac{B}{h_1} \right)^m$$

式中 β 为含水度,是不掺气时的清水水深 h_1 与掺气后水深 h_c 之比; B/h_1 为断面宽深比; n 为过流面糙度系数。括号内 3 个参数分别表示水流运动特性、阻力特性和断面特性。据现有资料统计,系数 $A=0.937$,指数 $m=-0.088$ 。

(2)射流掺气与雾化。高水头泄水建筑物采用挑流消能形式时,挑流水股在空中扩散、掺气,可提高消能效果,但挑射水股回落至电站下游河道时反弹形成雾化区,会影响电站出线 and 开关站布置。因此,采用挑流掺气消能时,要控制泄流雾化范围。

掺气发生条件 一般认为明渠水流自然掺气的临界条件是

流速	$V_1 > 6.5 \text{ m/s}$
弗劳德数	$Fr_1 = V_1 / \sqrt{gR_1} \geq 5$
能坡	$J > (Fr/28)^{1.6}$

溢流坝上水流由堰顶发展起来的紊流边界层到达水面,是掺气发生的必要条件,实际溢流坝上的边界层,是大雷诺数,粗糙边壁,具有自由面,而底壁具有竖向曲率的三维流动,比理想条件下的边界层计算要复杂得多,实用上多按经验关系估计边界层发展至水面的距离,来定掺气发生点位置 L_c ,最简单的形式是将其视为单宽流量 q (m³/s) 的函数,如

$$L_c = Bq^b$$

由原体实测资料给出系数 $B=(10\sim14.7)$,系数 $b=(0.53\sim0.72)$ 。

掺气减蚀 近年研究成果指出:水中掺气浓度大于 1%,空蚀情况将明显减轻,大于 6%~8%,空蚀几乎可以完全避免。因此,可采用工程措施使近壁水流掺气,从而减免建筑物遭受空蚀破坏。掺气减蚀的工程形式有:掺气槽、掺气坎(微突折流器)、突跌错台等。掺气减蚀技术的主要研究内容是:工程设施的体型尺寸、最优位置及其在水流近壁形成稳定空腔的水力条件,掺气槽供气系统及空腔进气量测算,掺气槽下游近壁水层掺气浓度的沿程变化规律及防蚀有效保护范围,掺气设施承受的水动力载荷,掺气设施室内试验的缩尺效应等。

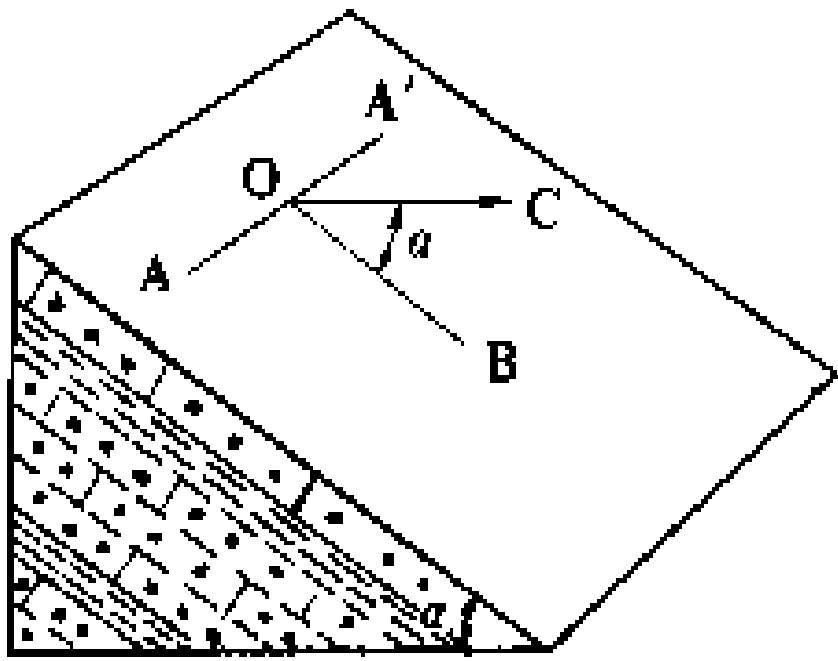
(时启燧)

chanzhuang

产状 (attitude) 地质结构面(岩层面、片理面、断层面、节理面等)的空间几何状态,包括走向、

Chang 长

倾向和倾角 3 个要素（见图）。走向是地质结构面的延伸方向，用水平面与地质结构面的交线（AOA'）的方向表示，如 N40°E（或 NE40°）、N60°W（或 NW300°）。



地质结构面产状示意图
倾角是垂直于走向方向上，地质结构面与水平面之间的夹角（α），表示该面在空间的倾斜程度。倾向是地质结构面的倾斜方向（OC，箭头指倾向方向），亦以磁方向表示，如 NE、NW、SE、SW 等。
地质结构面的产状可用地质罗盘在野外现场量

测。产状三要素的表示次序一般是走向、倾向、倾角，如 N40°WSW∠30°或 NW320°SW∠30°，其中 N40°W 或 NW320°为走向，SW 为倾向，∠30°为倾角。
(陈祖安)

Chang Jiang shuixi shuineng ziyuan
长江水系水能资源 [hydropower resources of Changjiang (Yangtze) river system]
据 1980 年《中华人民共和国水力资源普查成果》统计，长江水系理论蕴藏量为 23478.2 亿 kW·h/a，其中可能开发资源 10275.2 亿 kW·h/a（见水能资源）。长江水系水能资源占中国比重为 53%。水系内水能资源分布见表。

长江水系水能资源统计表

河流名称	流域面积 (km ²)	多年平均流量 (m ³ /s)	河长 (km)	落差 (m)	利用水头 (m)	理论蕴藏量 (亿 kW·h/a)	可能开发资源		
							电站座数	装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kW·h)
长江干流(江源—宜宾)	473000	4920	3481	5142	3755	5092.8	25	58913	3233.8
雅砻江流域	128444					2954.0	151	24941	1524.6
其中:干流		1810	1571	3870		1930.9	23	22158	1355.1
牛栏江流域	13185	173	423	1660	755	167.4	13	886	49.2
横江流域	14175	292	307	2079	1500	188.1	27	1099	60.5
其他支流						1517.3	151	3073	172.9
长江干流(宜宾—宜昌)	1005501	14300	1033	219	210	2161.1	4	31745	1488.9
岷江流域	133000					4282.4	322	30563	1671.7
其中:岷江干流		2850	735	3560	1702	719.8	30	3936	224.2
大渡河干流	77400	1510	1062	4177	3044.5	1840.6	27	20461	1088.0
青衣江干流	13300	565	276	2840	1534	213.4	8	861	51.1
沱江流域	27860	519	702	2354	384	133.8	45	263	16.0
赤水河流域	20440	309	524	1588	538	122.2	68	975	47.7
嘉陵江流域	160000	2120	1120	2300	561	1336.3	303	8699	407.7
乌江流域	87920					913.3	267	8340	415.8
其中:乌江干流		1650	1037	2124	1380	508.4	19	5606	292.0
其他支流						278.4	285	1258	55.8
长江干流(宜昌以下)	1800000	29000	1773	39		776.1			
清江流域	16700	464	423	1430	1022	219.4	125	1736.1	89.6
洞庭湖流域	262863					1630.6	1199	12336	564.8
其中:湘江干流	94660	2370	844	756	139.8	79.9	13	1007.4	47.24
资江干流	28142	759	713	972	325	97.0	20	1177.4	62.3
沅江干流	89163	2170	1022	1462	608	245.0	15	3494.9	1569.3
汉江流域	159000					958.0	465	6141	249.6
其中:汉江干流		1710	1577	1964	536	303.1	15	3360.2	122.22
鄱阳湖流域						561.0	508	5094.7	189.1
其中:赣江干流	83500	2130	751	937	152	97.2	9	2201	80.13
其他支流						186.26	511	1181.2	37.52
长江水系合计						23478.2	4469	197214.0	10275.2

长江干流发源于中国青藏高原的腹部，流域面积 180 万 km²，全长 6300 km，是中国最长的河流，流经青海、西藏、四川、云南、湖北、湖南、江西、安徽、

江苏、上海共 10 个省（市、自治区），注入东海。河口多年平均流量 29000 m³/s。长江支流众多，单河理论蕴藏量达 10MW 以上的河流有 1090 条，流域面积 5 万

km² 以上的支流有：雅砻江、岷江及其支流大渡河、嘉陵江、乌江、沅江、湘江、汉江和赣江。

干流资源 干流在支流当曲汇入前称沱沱河，汇入后到巴塘之间称通天河，巴塘以下到宜宾称金沙江，宜宾以下始称长江。其中宜宾到宜昌段又称川江，枝江到城陵矶段又称荆江，在江苏镇江以下又有扬子江之称。国际上普遍称长江为扬子江 (Yangtze River)。

宜宾以上河段长 3481 km，落差 5142 m。宜宾处多年平均流量 4920 m³/s。其中通天河中段以上为高平原型河道，水量不大，仅可能开发 3 座水电站，装机容量 164 MW，年发电量为 7.7 亿 kW·h。通天河中段以下及整个金沙江为深谷型河道，有适宜于建高坝的条件，径流丰富，水头集中，可能开发 22 座水电站，装机容量 58749 MW，平均年发电量 3226 亿 kW·h，占全水系的 31%，是全水系中可能开发资源最丰富的河段。其中溪落渡、向家坝水电站正进行可行性研究。

宜宾 宜昌段穿过四川盆地与三峡山地，河长 1030 km，水面落差 219 m，是长江宜昌以下成灾洪水的主要区段之一，航道也待改善。三峡峡谷段提供了有利的开发条件。1981 年以前规划 4 级开发，利用水头 210 m，其中三峡水利枢纽正常蓄水位 200 m，装机容量 25000 MW，平均年发电量 1110 亿 kW·h。4 级水电站合计装机容量 31745 MW，平均年发电量 1489 亿 kW·h。1993 年三峡水利枢纽设计审查确定正常蓄水位 175 m，装机容量 18200 MW。因三峡水利枢纽正常蓄水位降低，本河段改为 5 级开发，可装机 24430 MW，平均年发电量 1219 亿 kW·h。三峡水利枢纽已于 1993 年 7 月进入施工准备阶段。

长江干流宜昌以下为平原型河道，河长 1773 km，落差 39 m，径流量虽很丰富，但限于淹没损失难于开发利用。

雅砻江流域水能资源 流域面积 12.8 万 km²，在四川省境内，于攀枝花市汇入金沙江，河口处多年平均流量 1390 m³/s。其干流长 1571 km，落差 3870 m，水能资源理论蕴藏量 1930.9 亿 kW·h/a，可能开发 23 座水电站，装机容量 22158 MW，平均年发电量 1355.1 亿 kW·h，是仅次于金沙江段的资源丰富河流。梯级中两河口、锦屏和二滩水电站的水库（见雅砻江水电规划）是调节径流的控制性工程。据开发条件和地区经济发展要求将先开发锦屏以下的 5 级，其中二滩水电站正在建设。

岷江流域水能资源 流域面积 13.3 万 km²，大部在四川省境内，于宜宾市汇入长江。河口处多年平均流量 2850 m³/s。其干流长 735 km，水面落差 3560 m，水能资源理论蕴藏量 719.8 亿 kW·h/a。其上游是深谷型河道，中下游是盆地地形河道。干流有可能开发水电站

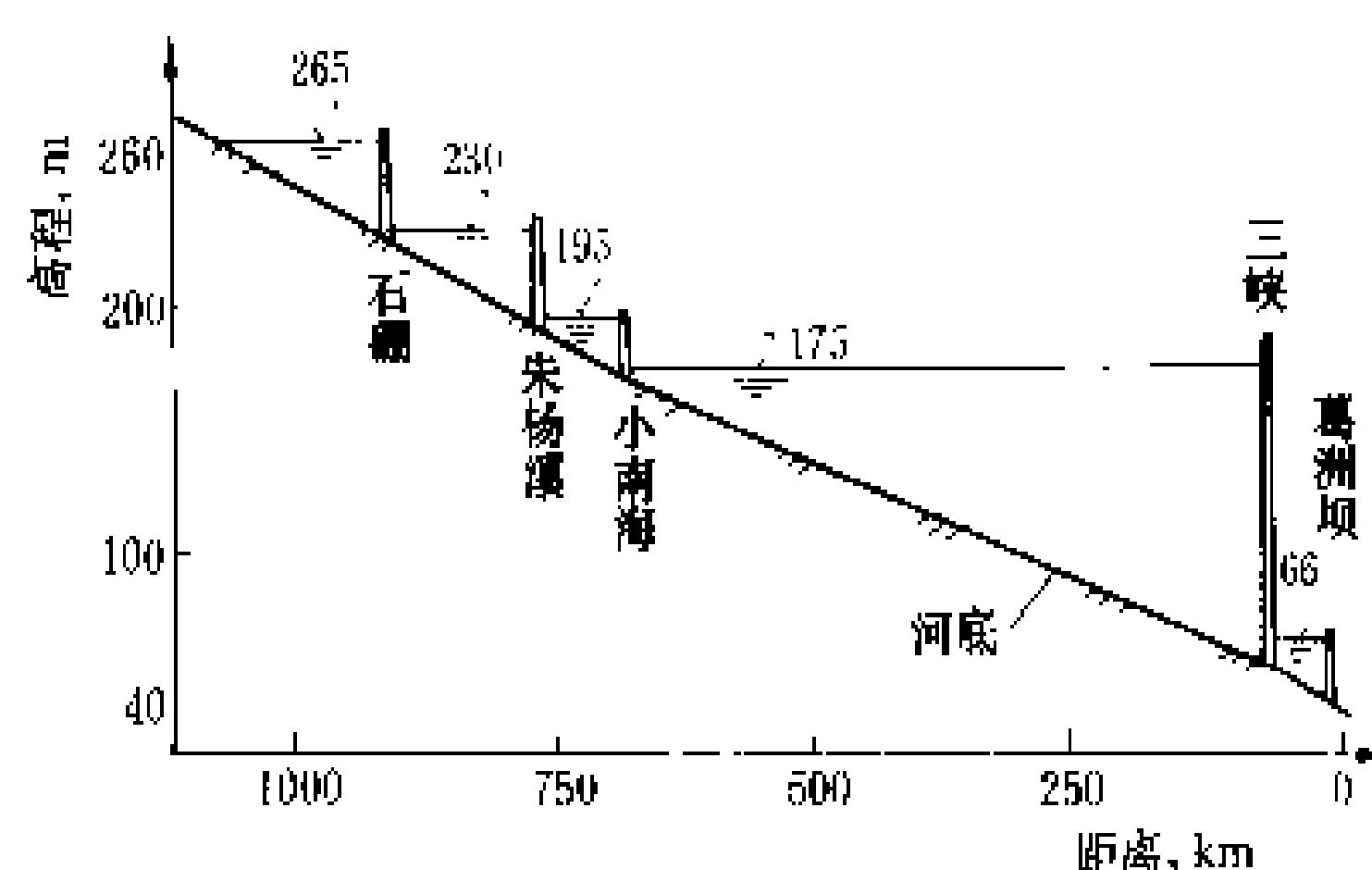
30 座，利用水头 1702 m，可装机 3936 MW，其年发电量为 224.2 亿 kW·h。

大渡河是岷江的最大支流，于乐山市汇入岷江。大渡河流域面积 7.7 万 km²，河口处多年平均流量 1510 m³/s。干流长 1062 km，水面落差 4177 m，水能资源理论蕴藏量 1840.6 亿 kW·h/a，有可能开发水电站 27 座，利用水头 3044.5 m，可装机 20461 MW，其年发电量为 1088 亿 kW·h。其中独松至铜街子（见大渡河水电规划）段为重点开发段。龚嘴水电站一期装机容量 707.5 MW，已运行；铜街子水电站正在建设。

乌江流域水能资源 流域面积 8.8 万 km²，大部在贵州省境内，于四川省涪陵市汇入长江。干流河口处多年平均流量 1650 m³/s。干流长 1037 km，水面落差 2124 m，水能资源理论蕴藏量 508.4 亿 kW·h/a。干流有可能开发水电站 19 座，利用水头 1380 m，可装机容量 5606 MW，其年发电量为 292 亿 kW·h。其中乌江渡水电站已投入运行，东风水电站正在建设。

（曹学敏）

Chang Jiang Yibin - Yichang duan shuidian guihua
长江宜宾—宜昌段水电规划 [hydropower development planning of the Yibin - Yichang reach of Changjiang (Yangtze) river] 重点在于减免洪灾损失、利用水能发电和提高河道通航能力。根据长江水利委员会 1988 年编制的《长江流域综合利用规划要点》报告，在从宜宾到宜昌河段安排有石砬、朱杨溪、小南海、三峡和葛洲坝 5 级水电站（见图）。



长江宜宾—宜昌段梯级水电站布置图

其中三峡水利枢纽是为防洪、发电、航运服务的控制性工程，其水库承担主要的调节任务。葛洲坝水利枢纽的水库承担反调节任务。其余 3 座是径流式水电站。5 座水利枢纽共有总库容 489.8 亿 m³，可用于调节洪水的库容有 221.5 亿 m³，为发电、航运调节径流的库容有 167.9 亿 m³。发电共利用水头 215.5 m。5 座电站共装机 25425 MW，平均年发电量 1275 亿 kW·h。

长江宜宾—宜昌段又称川江，河段长 1033 km，落

chang 厂

差 219.2 m, 河道平均比降为 0.021%。宜昌水文站以上的流域面积为 100 万 km², 其中在本河段汇入的支流流域面积占半数以上。宜昌水文站平均年水量 4510 亿 m³, 平均年输沙量 5.3 亿 t。本河段拥有水能理论蕴藏量 (见水能资源) 2161 亿 kW·h/a。

长江宜宾至重庆段流经丘陵, 两岸地势较低, 人口较稠密, 为减少水库淹没损失不宜建高坝大库。开发本河段的主要任务是改善河道通航条件并结合发电。在该河段布置有石硼、朱杨溪和小南海 3 座枢纽。为不淹宜宾市, 选石硼枢纽的正常蓄水位为 265 m; 为不淹泸州市, 选朱杨溪的正常蓄水位为 230 m; 而小南海的正常蓄水位为 195 m。

长江从重庆至宜昌段流经峡谷, 两岸山势陡峻, 河谷狭窄, 河床深切。开发本河段的主要任务之一是防洪。因本河段是控制长江上游洪水的咽喉要地, 控制武汉市洪水来水的 2/3 以上, 又距重点防洪的荆江地区较近。主要任务之二是水力发电。因本河段水能资源丰富, 且距川东、华中、华东电网的距离较近。主要任务之三是改善航运, 利用库区回水可增大航道水深, 而水库调节径流后又增大长江中下游枯水期流量。本河段最下游的葛洲坝水利枢纽已经建成, 其正常蓄水位与三峡水利枢纽的尾水位相衔接, 为 66 m。葛洲坝水利枢纽利用水头 27 m, 装机容量 2715 MW, 平均年发电量 157 亿 kW·h。待三峡水利枢纽建成投产后, 葛洲坝水利枢纽将成为反调节水库, 把三峡电站发电后的日内不均匀流量调节成均匀的流量出库以适应航运要求。

1992 年 4 月中国第七届全国人民代表大会第五次会议通过了关于《兴建长江三峡工程的决议》, 把三峡水利枢纽建设列入国家 1991~2000 年国民经济和社会发展规划。1993 年 7 月国务院审查批准了《长江三峡水利枢纽初步设计报告 (枢纽工程)》, 同年工程进入施工准备阶段。批准的建设方案是: 重庆到三斗坪之间河段只设一座三峡水利枢纽, 正常蓄水位为 175 m, 但初期为 156 m; 一次建成; 分期蓄水以降低移民强度; 连续移民。按此方案, 三峡水利枢纽水库有防洪库容 221.5 亿 m³ (初期 110.8 亿 m³), 当遇百年一遇以下洪水时, 不需启用荆江分洪区就可使沙市水位不超过 44.5 m (沙市位于三峡水利枢纽下游, 其水位高低可直接反映荆江段洪灾损失大小), 从而减轻或免除洪灾损失。当遇千年一遇或类似 1870 年洪水时, 经三峡水库控泄洪水并由荆江分洪工程配合运行, 可使沙市水位不超过 45 m。三峡水库有调节库容 165 亿 m³ (初期 87.8 亿 m³), 可使枯水期调节流量达到 5860 m³/s (初期 5130 m³/s)。三峡水利枢纽电站装机容量 18200 MW, 平均年发电量 846.8 亿 kW·h (初期 700 亿 kW·h), 供电给华中、华东和川东地区。三峡水库

回水到重庆港, 约有半年时间可使万吨级船队直达重庆九龙坡港, 使航道单向下水的年通过能力提高到 5000 万 t。同时, 因宜昌以下枯水期流量由 3000 m³/s 提高到 5000 m³/s 以上, 也有利于荆江航道的维护和船舶运行。三峡水利枢纽的汛期限制水位为 145 m (初期 135 m), 比死水位 155 m 还低。选择较低的汛期限制水位以增大防洪库容, 选择较高的死水位以保证库区航道有足够的水深。

(陈励元)

changfang cainuan

厂房采暖 (power house heating) 向水电站主、副厂房供热的技术措施。厂房采暖是为保证冬季厂内各处设备的正常运行和运行人员工作必要的环境条件。主要有电辐射板采暖、热风采暖和电炉采暖 3 种方式。

(1) 电辐射板采暖, 是一种卫生和舒适条件都比较好的采暖方式, 用产生波长为 3~5 μm 红外线的电加热器采暖。

(2) 热风采暖, 分为发电机热风采暖和电热风采暖两种方式。①在发电机顶盖上设置热风窗, 把发电机内的热风引出来作为厂房采暖的热源。②在送风管中配置空气电加热器, 加热空气送入厂房。

(3) 电炉采暖, 直接用电炉作厂房采暖热源。

(朱世琦)

changfang tongfeng

厂房通风 (power house ventilation) 水电站主、副厂房进行室内外空气交换并调节厂房温度和湿度的技术和设施。厂房通风是为保证厂内机电设备正常运行以及为值班及检修人员的健康创造必要的环境条件 (包括厂内空气的温度、相对湿度、流速及新鲜空气的含量等)。厂房通风有自然通风和机械通风两种方式。

通风要求 不同的场所对通风有不同的要求。

(1) 主厂房的发电机层、母线室 (道)、配电装置室、变压器室等处的通风主要是排除室内余热, 防止夏季空气温度过高而限制设备的出力和影响工作人员的健康。

(2) 主厂房的进口阀层 (室)、水轮机层、水泵室等处的通风主要是排除室内的潮湿空气, 以防止空气相对湿度过高, 造成设备锈蚀, 电气设备绝缘下降等。

(3) 铅酸蓄电池室、油库、油处理室等处的通风主要是排除室内设备在生产过程中产生的有害气体。

(4) 中央控制室、电子计算机室、通信室等处的通风主要满足设备对环境温度、相对湿度及空气中灰尘

允许浓度的要求，并应考虑工作人员的健康与舒适。

自然通风 利用室外风压和室内外空气密度差造成的热压而引起的空气流动,达到室内通风换气的目的。它不需要专门的动力设施,是一种比较经济的通风方式。地面厂房的自然通风是依靠门、窗来组织厂房的进、排风。地下式厂房或坝内式厂房则利用处于较低位置的隧洞(如交通洞、无压尾水洞等)进风,利用处于厂房较高位置的隧洞(如出线洞等)排风。图1为地下厂房自然通风系统透视图。

机械通风 依靠通风机造成的压力使空气流动，达到室内通风换气的目的。有机械送风自然排风、机械排风自然进风和机械送风机械排风 3 种形式。

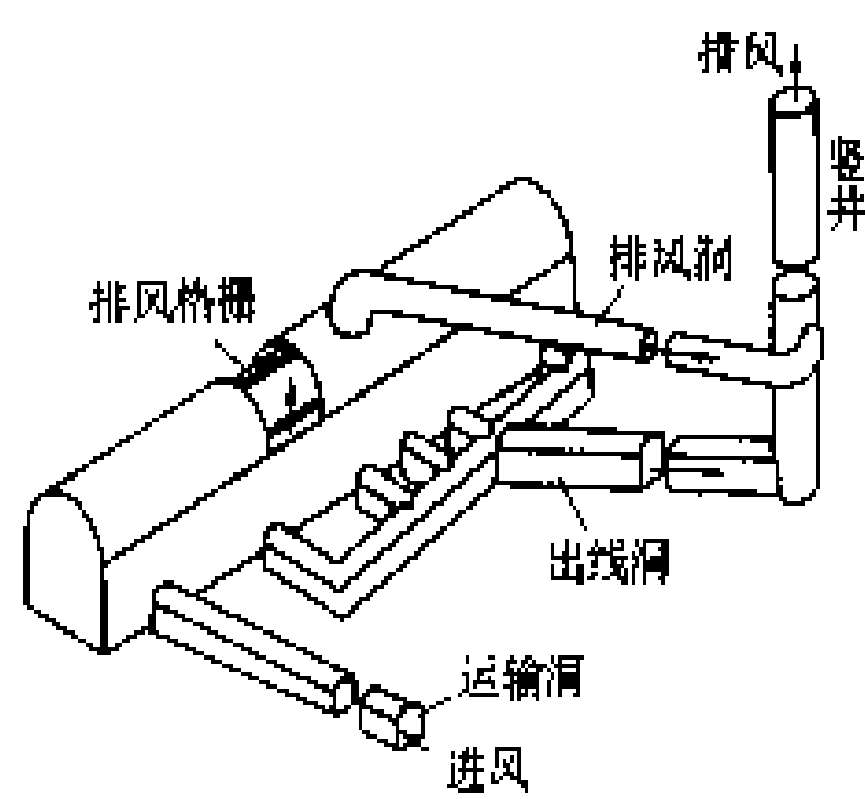


图 1 地下厂房自然通风系统透视图

(1) 机械送风
自然排风。利用风机将室外空气升压送入室内，在室内进行热、湿交换后依靠余压排到室外。达到通风换气的目的。




图 1 地下厂房自然通风系统
透视图

(2) 机械排风自然进风。室内空气利用风机升压后排到室外, 室外的新鲜空气经过门窗, 孔洞等进入室内, 形成室内的通风换气过程。图 2 为地下厂房机械排风自然进风系统透视图。

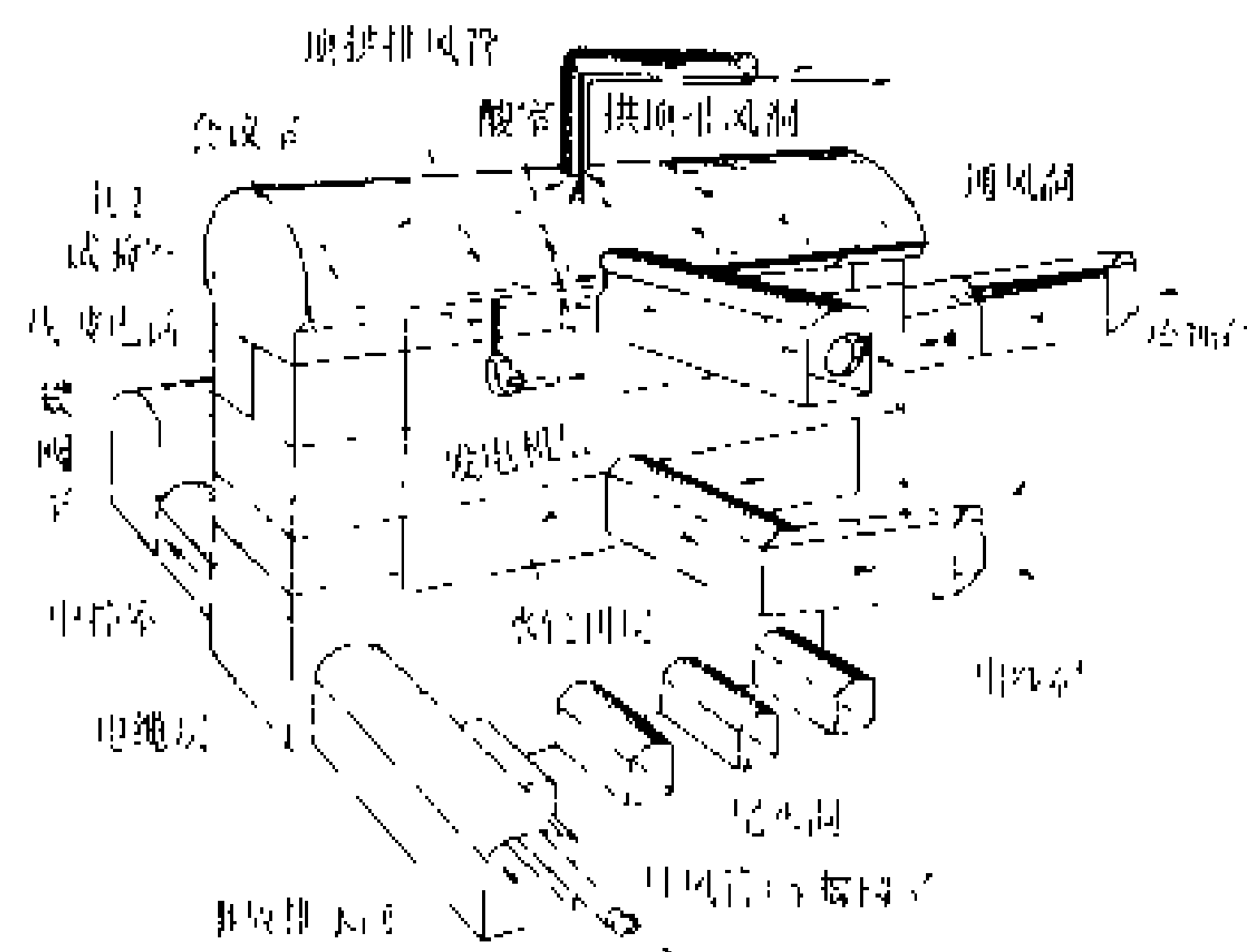


图 2 地下厂房机械排风自然进风系统透视图

(3) 机械送风机械排风。利用风机将室外新鲜空气送入室内, 经过热、湿交换后的室内空气再用风机排到室外。

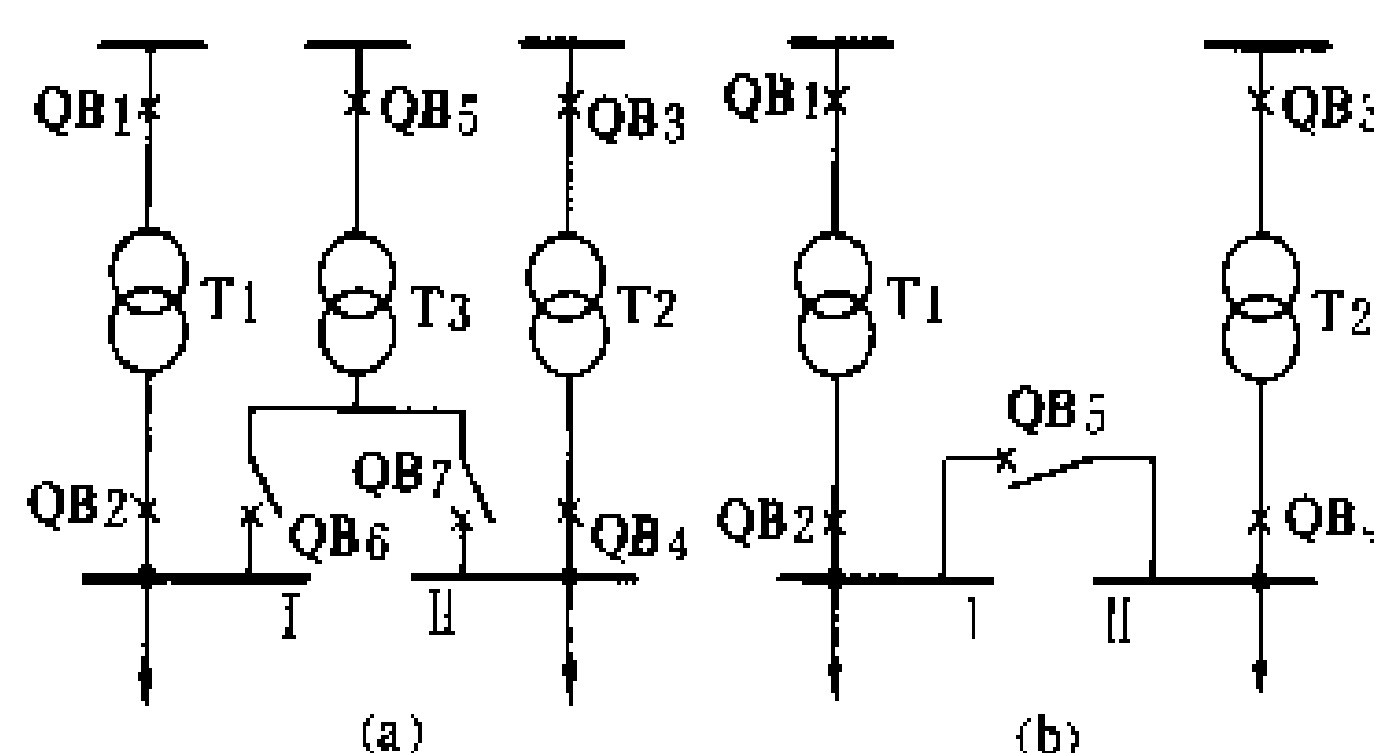
(朱世琦)

changyongdian beiyang dianyuan zidong laoru

厂用电备用电源自动投入 (automatic swit-

ching of station service auxiliary power supply) 厂用电负荷的供电系统设工作电源和

supply) 厂用电负荷的供电系统设工作电源和备用电源,正常时由工作电源供电,当工作电源因故障而退出运行后,由备用电源自动投入装置将备用电源投入,保证电站用电负荷的连续供电。备用电源分为明备用和暗备用,其供电系统电气一次接线如图所示。图(a)中 T1、T2 为工作变压器, T3 为备用变压器,当 T1 或 T2 或其任一电源因故障退出运行后,自动投入 T3 接替供电,这种方式称为明备用(也称设备备用)。图(b)中 T1、T2 同时运行,正常时各自向所带母线段 I、II 供电,当 T1 或 T2 或其任一电源因故障退出运行后,自动投入 QB5,两段母线上的负荷,改由一台变压器供电,称为暗备用。图中所示为高压厂用系统,当变压器低压侧为 400 V 时,则可构成低压厂用系统接线,工作原理相同。



供电系统电气一次接线图
(a) 明备用; (b) 暗备用

备用电源自动投入装置由电压继电器、时间继电器、中间继电器等构成，其技术要求是：①只要工作电源的电压消失，备用电源即应投入。②只有在工作电源断开后，才允许投入备用电源。③只要求自动投入装置动作一次。④当工作电源消失后，只有在备用电源正常时自动投入装置才动作。⑤自动投入装置的动作时间尽可能短，以利电动机的自起动。⑥当自动投入装置将备用电源投入于永久故障时，要迅速由继电保护切除。

(賀至剛)

changyongdian dianyu

厂用电电源 (station service power supply)

向水电站水轮发电机组和主变压器的附属设备、全厂生产辅助设备、厂坝区公用设施和照明负荷供电的中源。

厂用电电源的要求 厂用电的电源应满足电站各种不同运行工况下,在数量、电压、容量等方面能满足厂用电负荷供电可靠的要求。(1)厂用电电源的数量,通常根据电站规模确定。对中型水电站要有2个及以上的独立电源,其中1个是外来电源,在全厂停机时,可允许仅有1个厂用电电源运行。大型水电站要有3个及

chang 厂

以上的独立电源,其中至少有1个是外来电源,在任何运行方式下,要保持2个厂用电电源运行。外来电源的作用是在全厂停止运行时,保证对重要的厂用电负荷供电。几个独立电源可以同时投入供电,互为备用。也可采用工作电源运行,备用电源不投入运行,当工作电源故障时,备用电源自动投入运行的工作方式。②厂用电电源的电压。当厂用电设备负荷相对较集中,全厂厂用电负荷不大,且无高压电动机负荷时,如中型水电站,一般采用低压0.4 kV一级电压供电,可减少变压器重复损耗和厂用配电装置数量,有利于厂房布置。当水电站厂区范围较大,厂用负荷较大或有高压厂用电动机负荷时,则采用两级电压供电,高一级电源电压一般采用6~10 kV,对远距离的厂用负荷和高压电动机供电。其他厂用电负荷则经(6~10) kV/0.4 kV厂用降压变压器降压后,以0.4 kV电压供电。③厂用电源变压器容量,一般按厂用电负荷特性统计分析后选取。④对采用变频起动装置作为发电电动机抽水起动方式的抽水蓄能电站,要考虑变频起动过程中谐波的影响,必要时应采取滤波措施。

独立电源的来源 一般有以下几种来源。

(1)由发电机主引出线引接厂用电电源变压器,是常用的方式,具有方便、简单、经济、可靠的优点。发电机出口如装有断路器,发电机停止运行时,开断断路器,即可由电力系统经主变压器倒送电,作为厂用电电源。若不装出口断路器,就没有停机时由电力系统倒送厂用电电源的优点。在电力系统中担负调峰的水电站,机组每日都有停机的机会,当水电站采用单元接线时,对接有厂用电电源变压器的发电机出口,一般装设断路器。

(2)水电站两级升高电压间有联络自耦变压器时,通常利用其第三绕组引接厂用电电源变压器。这种方式具有可靠、经济、方便的优点,但需考虑电压波动和短路电流的问题,必要时需装设有载调压装置。

(3)当水电站附近有地区配电网时,可由该配电网引接厂用电电源变压器。将水电站施工使用的变电所和线路按永久性建设,引接厂用电电源变压器,同时还可兼作水电站所在地的近区用电,也是比较经济、方便的方式。这是目前水电站常用的外来厂用电电源方式。

(4)由开关站的高压母线引接厂用电电源变压器,电源可靠,不受机组停止运行的影响。但需配置高压电源变压器及相应高压开关设备,对于500 kV及以上出线电压的水电站投资大、损耗大。

(5)梯级水电站或水电站群,当其地理位置相近,它们之间有6~35 kV的供电联络线时,利用其联络线引接厂用电电源变压器,也是很合适的选择。

(6)装设快速起动的柴油发电机,是抽水蓄能电站

和调峰频繁的水电站厂用电备用电源的一种方式。虽然可靠性高,但投资大,维护工作量大,年运行费高,通常只作为事故备用电源。

(7)单独装设厂用小型水轮发电机组作为厂用电电源,供电可靠,但价格昂贵,维护工作量大,年运行费高,现在很少采用。

(黄贤鉴)

changyongdian tune

厂用电负荷 (station service load) 水电站水轮发电机组和主变压器的附属设备、全厂生产辅助设备和厂坝区公用设施所需的电力和电量。水电站在正常情况下,约有50%~70%的厂用设备是不经常运行的,只有少数设备经常处于运行状态,且大部分设备所需要负荷是间歇性的。根据中国电站统计的资料,厂用电电源变压器的容量一般只占电站装机容量的0.4%~1.5%。对采用可逆式机组的抽水蓄能电站,在抽水起动过程采用同轴小电机或变频装置作为起动方式时,其起动负荷约为抽水蓄能机组单机容量的6%~8%,则厂用负荷还需计及这部分负荷。所以抽水蓄能电站的厂用电负荷比常规水电站大。

厂用电负荷分类 厂用电负荷通常按用途、重要程度、运行方式、是否需要自起动等分类。

(1)按用途分类,可分为机组自用电和全厂公用电两大类。①机组自用电。通常是指机组辅助设备或发变单元辅助设备所需要的负荷,其中包括用电负荷油压装置油泵、机组顶盖排水泵、技术供水泵、轴承润滑油系统和冷却用油泵和水泵、漏油泵、机组自动装置用电源、蝶阀(球阀)压油泵、励磁的整流装置冷却风扇电源、水内冷机组的循环水泵、加热器、发变单元的主变压器冷却系统用电负荷等。也有把油压装置用的空压机以及机组调相和抽水蓄能机组起动压水用的空压机也列入机组自用电。采用同轴小电机作为抽水蓄能机组起动方式时,还需计及小电机的用电负荷。②全厂公用电。包括压缩空气系统、油处理系统、水系统、蓄电池组充电系统、通风系统、电热、照明、变频起动装置、起重运输机械、机修厂、试验室、检修机具、非单元接线的主变压器冷却系统以及检修用电、事故和消防用电负荷等。

(2)按负荷重要性程度分为3类。①I类负荷。只允许瞬时中断电源。此类负荷除机组轴承润滑系统用电动机及水内冷机组冷却水泵的允许中断时间仅为电源自动切换操作时间外,其余负荷允许电源中断时间一般不超过几分钟。停止此类负荷供电将使设备不能正常运行或停止运行,甚至使设备受到损坏。属于此类负荷的还有主变压器冷却系统、水轮机调速系统、进水

阀、油压装置油泵、快速闸门启闭设备、励磁装置晶闸管冷却系统、空气断路器用气系统、技术供水泵和消防用水泵等。这类负荷要有两个供电电源或一个电源运行、另一个电源作为备用，并能自动互相切换，恢复供电后，电动机应能自起动，并正常工作。②Ⅱ类负荷。允许电源中断数十分钟，即允许通过人工操作切换恢复供电。停止此类负荷供电，不会造成设备损坏或不会使电站正常运行受到影响。属于这类负荷的有蓄电池的充电及浮充电装置、油压装置用空压机、渗漏排水泵、主厂房起吊设备、照明等。这类负荷一般要有两个供电电源，备用电源可以手动切换，其中部分电动机还能自起动恢复工作。③Ⅲ类负荷。一般允许较长时间停止供电，不会直接影响运行。属于这类负荷如机修厂、油处理系统的电动机。这类负荷一般只要一个供电电源。

(3)按运行方式分类，一般可分为4类。①经常连续运行负荷。②经常断续或短时运行负荷。③不经常连续运行负荷。④不经常断续或短时运行负荷。其中经常或不经常，是区别负荷的使用机会。连续是指每次使用连续带负荷运行2h以上。短时是指每次使用连续带负荷运行2h以下10min以上。断续是指每次使用从带负荷到停止运行，反复周期地工作，每个周期不超过10min。

(4)按是否需要自起动分类。根据负荷的工作性质，决定哪些负荷当故障消除、备用电源自动投入后，即需自行起动恢复工作；哪些负荷可以不自行起动，由人工起动。并以此来验算选定的厂用变压器或其他厂用电电源的容量。

厂用电负荷统计 根据厂用电负荷分类，按全厂机组运行、一台机组大修而其余机组正常运行、全厂机组停止运行等3种运行方式进行统计分析，计算最大厂用电负荷和需要的备用电源容量，以确定厂用变压器和配电设备的容量，以及厂用电接线的运行方式。

(黄贤鉴)

changyongdian jhexian

厂用电接线 (station service power connection)

连接水电站厂用电电源、配电设备和负荷的电路方案。它是厂用电系统短路电流计算以及设备、导体和电缆选择的基本依据，是厂用电系统安装和运行维护的基础资料。

厂用电负荷较小、供电距离较短的水电站，通常采用0.4kV一级电压供电，这种接线多用于中小型水电站。厂用电负荷较大、厂区范围较广、供电距离较远、且有高压厂用电电气设备的水电站，多采用高、低两级供电电压。高压为6kV或10kV，低压为0.4kV或

0.66kV(见图1)，引水式的中型水电站，厂房与大坝距离较远，如果厂用电接线只有0.4kV一级电压，则设专用坝区用电变压器，以6kV或10kV电压向坝区供电。

厂用电接线基本要求 要求供电可靠、接线简单、经济合理。

(1)供电可靠。主要有3个方面要求，①选用质量合格的厂用电配电设备。②厂用电配电设备上下各级之间保护动作选择性配合合理，不发生故障时越级跳闸。③保证重要的厂用电负荷供电电源可靠，应有两个电源供电，当任一电源故障时，另一电源应能自动切换投入，不影响负荷的连续供电。

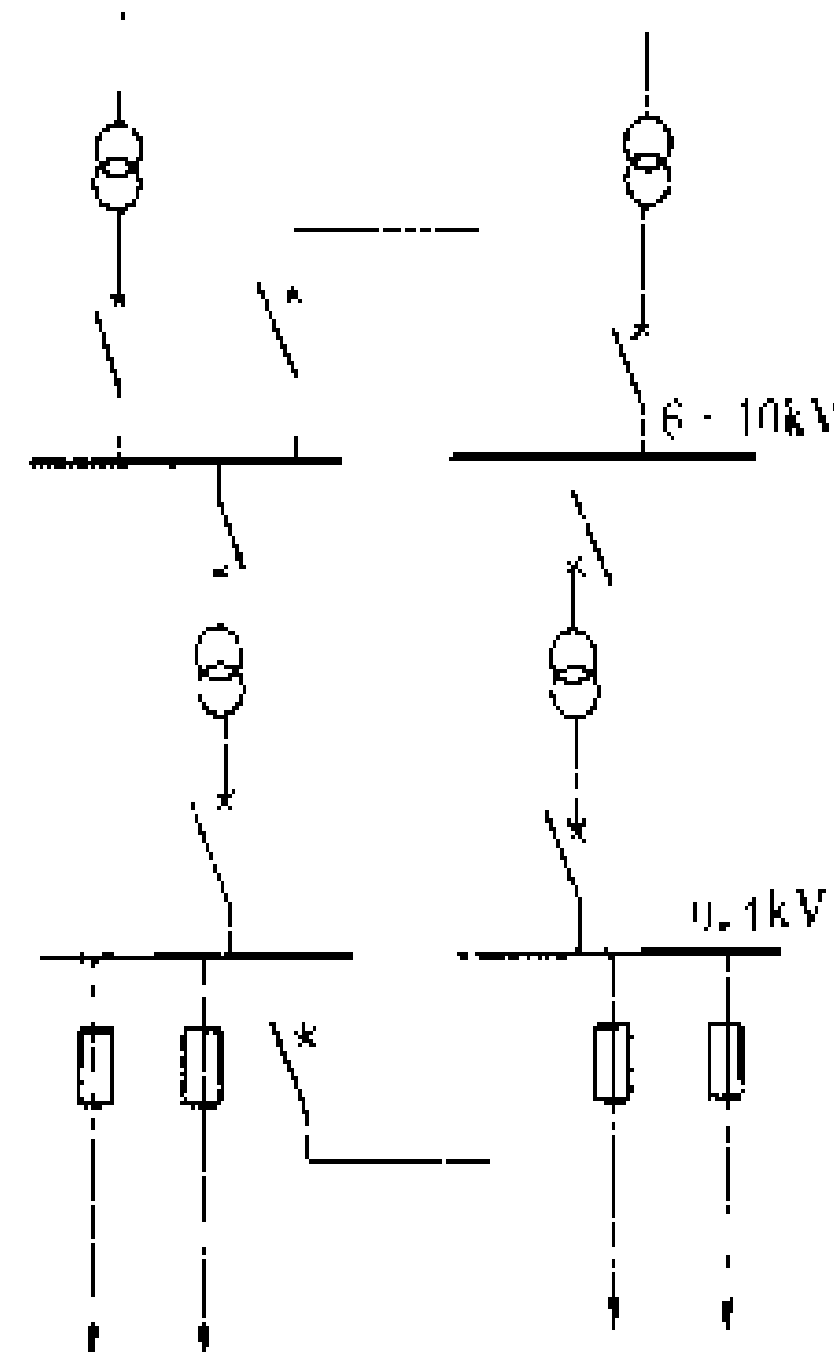


图1 两级电压厂用电接线简图

(2)接线简单。指电源、设备和负荷之间连接清晰明了，尽量简化接线，减少因设备间连接复杂互相影响而增加故障概率，也便于操作维护和管理，减少误操作事故，从而提高厂用电系统的运行可靠性。

(3)经济合理。在技术优越性基本相同的基础上，力求造价最省。

接线形式 水电站厂用电系统都采用单母线接线

形式，具有简单、清晰、运行维护方便等特点。厂用电电源6~10kV主配电屏和各动力负荷分配电屏组的厂用电接线方式基本有两种：一为单母

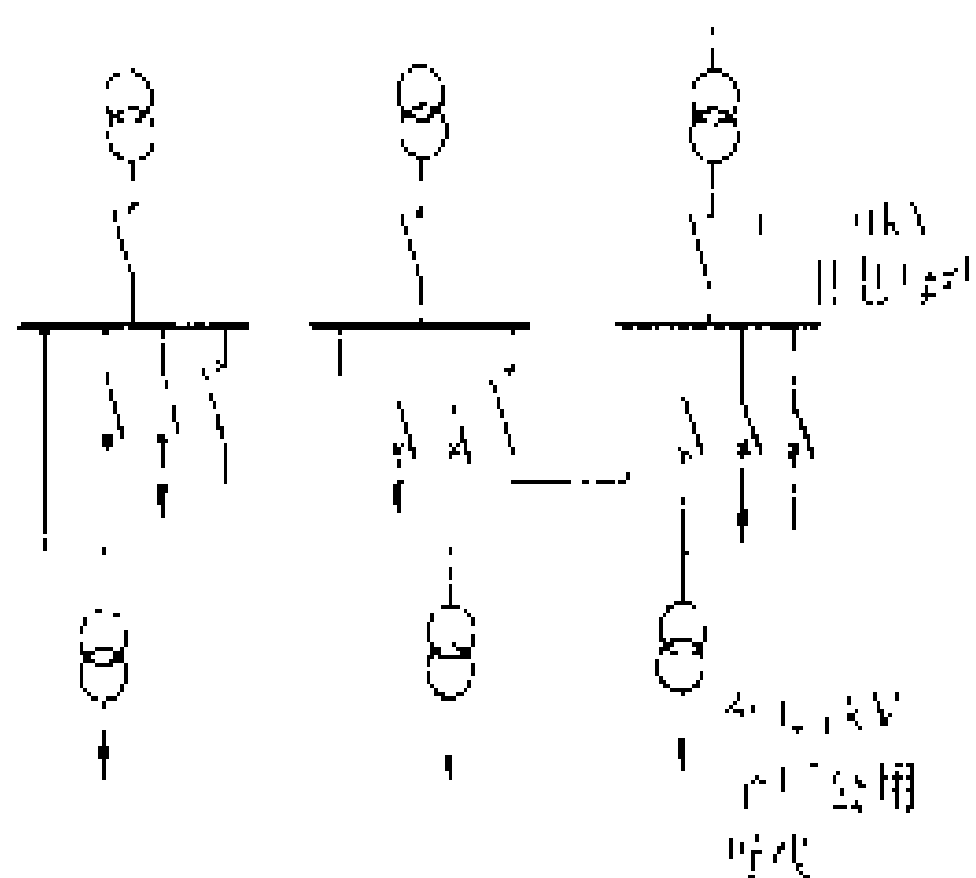


图2 厂用电电源6~10kV主配电屏单母线多分段环形接线简图

线上一般有两个电源供电，可互相切换，互为备用；另一为单母线多分段，每一分段母线上接一个电源，并通过分段联络断路器来实现电源的互为备用，如图2所示。为提高大型水电站厂用电电源主配电屏接线的可靠性，要求在任一分段母线检修时，其他分段母线仍应有两个及以上的供电电源，以适应各种运行方式，对电源主配电屏也有采用多分段环形接线的。

(1)机组自用电接线。机组自用电是指水轮发电机组辅助设备的用电，如油压装置、润滑系统、机组和主变压器的冷却系统、蝶阀（球阀）、水轮发电机励磁等的油泵、水泵和风扇等的用电负荷。其供电接线有3种基本形式。①由每台发电机机端出线接一台机组自用电电源变压器，作为本机组自用电负荷的供电电源，并由全厂低压公用动力配电屏母线至少引接一回电源作为第二供电电源。这种接线方式供电可靠性较高，但投资较大，对调峰频繁的水电站适应性较差。②机组自用电由全厂厂用电低压主配电屏的两段母线上各引接一回电源接入机组自用电配电屏，并行供电。这种接线是调峰的水电站机组自用电的常用接线形式之一。③有两级厂用电压的大型水电站，也可由高压电源主配电屏不同分段母线上，直接引下两回及以上电源经厂用降压变压器，接至机组自用电配电屏，向机组用电负荷供电。这种方式也是常用的机组自用电接线形式。如果机组自用电有高压设备时，这部分设备则直接由高压主配电屏供电。

(2)全厂公用电接线。全厂公用电是指全厂公用的水系统、油系统、压气系统、开关站系统、厂用通风采暖系统、照明系统、检修系统、全厂起吊设备的用电负荷和检修临时用电等。当厂用电接线只有0.4 kV（或0.66 kV）一级电压时，因负荷相对集中，通常采用大部分厂用电负荷由厂用电电源主配电屏母线直接向全厂负荷供电的接线形式。对有高低两级电压的厂用电接线，一般根据电站具体布置情况，将厂用电系统分为高压厂用电源配电屏和低压厂用电源配电屏，并分为若干配电屏组，分别向周围较近的负荷供电。

（黄贤鉴）

chaoxi dianzhan

潮汐电站（tidal power station）利用潮汐能发电的电站。在海湾或河口筑坝形成水库，用泄水闸控制库水位变化滞后于潮位变化以形成水头，推动水轮发电机组发电。潮汐电站有单库单向、单库双向和双库3种开发方式。潮汐电站的优点有：①不耗燃料；②不污染空气；③水库淹没损失少；④可结合航运、围垦海涂、水产养殖等综合开发。缺点有：①土建工程量较大、利用水头较低，所以单位千瓦投资较高；②按潮汐规律发电，出力过程不能控制，对电力系统运行不利。因此世界各国还没有大力开发利用潮汐能资源。

潮汐现象 在月球和太阳的引潮力作用下，海水发生周期性相对运动。潮位有涨有落，不断循环。由于地球、月球和太阳三者运行的相对位置按规律周期性变化，所以潮位变化也有规律。如：①以太阴日为周期（24 h50 min），每周期发生一次或两次由高潮位降到

低潮位再涨到高潮位的循环过程。高潮位与低潮位之间的高程差称为潮差。②以太阴月为周期出现两次大潮（潮差最大）和两次小潮（潮差最小）的循环过程。因各地的纬度、地形等条件不同，各地潮差和潮位循环周期并不一致。中国沿海潮差分布的趋势是东海沿岸的潮差最大，其平均潮差为5 m；渤海、黄海次之，为2~3 m；南海最小，小于2 m。中国最大潮差出现在钱塘江河口，近9 m。世界最大潮差出现在加拿大芬地湾（Bay of Fundy），达19.6 m。

开发方式 潮汐周期性相对运动遍及整个海面，但现在开发利用的，一般只在潮差较大的海湾或河口。因为在海湾或河口可以用相对少的土建工程量建成库面积较大的水库。在潮差大的条件下可取得较大的发电水头和调节库容，从而获得较大的发电效益。

潮汐电站有3种开发方式，可根据经济比较选择。

(1)单库单向电站（见图1）。建一个水库，一般是在落潮时引库内水通过水轮发电机组发电，涨潮时只引水入库不发电。单库单向电站又可分为有抽水设施或没有抽水设施两种。没有抽水设施的单库单向电站的运行过程见图1（b），分为3个阶段。①充水阶段，涨潮时，关闭机组，开启水闸引海水入库。库水位 $z(t)$ 随潮位 $Z(t)$ 同步升高，待潮位达到高潮位时为止。

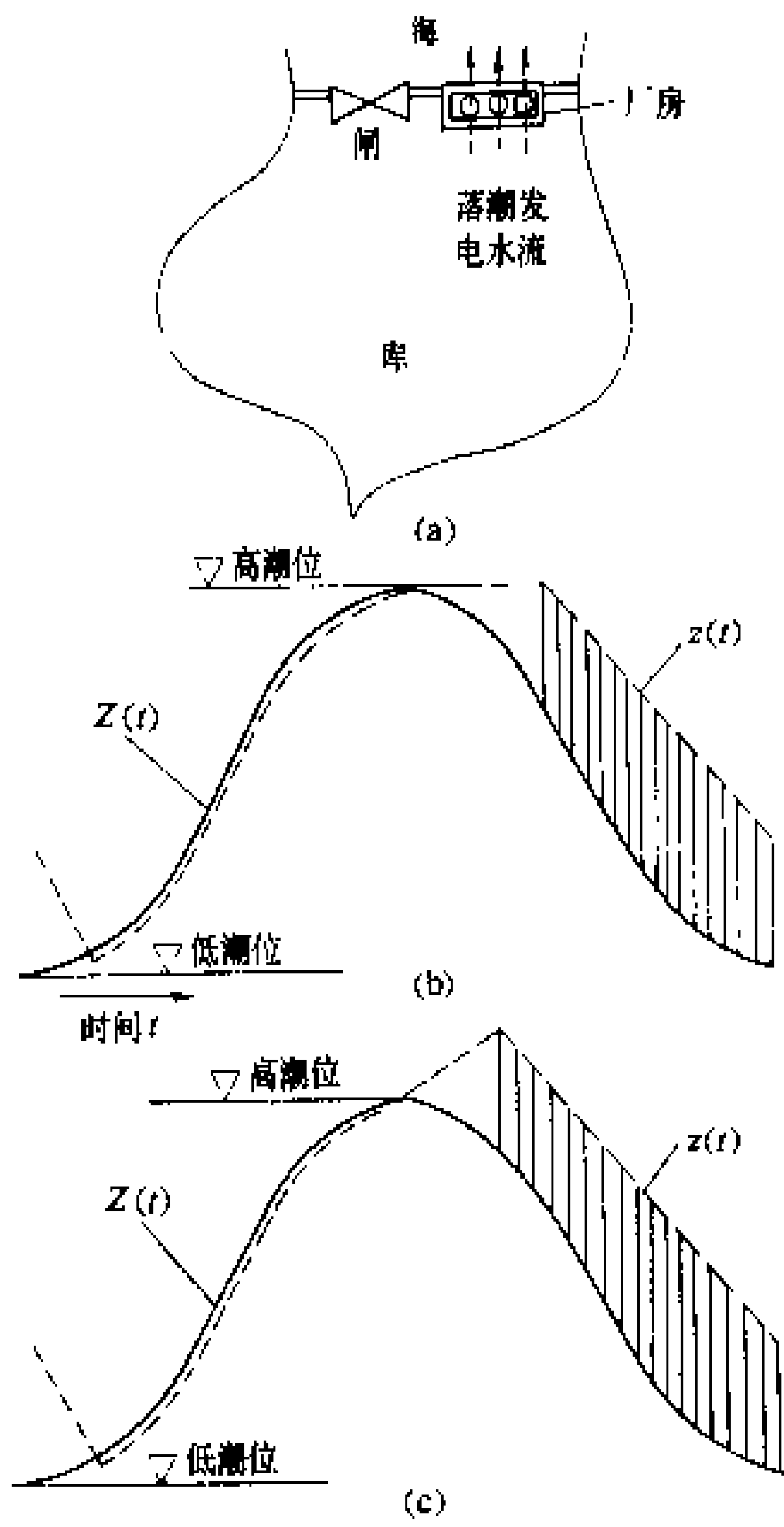


图1 单库单向电站

(a) 开发方式示意图；(b) 无抽水功能电站的运行过程；
(c) 有抽水功能电站的运行过程

②等待阶段，潮汐进入落潮期，泄水闸和机组都关闭， $z(t)$ 保持在高潮位不变，但 $Z(t)$ 下降，到 $z(t) - Z(t) = H_{min}$ 为止。 H_{min} 由机组特性确定，即水头小于 H_{min} 时机组不能发电。③发电阶段，潮位仍继续下降，开启机组发电， $z(t)$ 也下降，要控制发电流量使水位差保持 $z(t) - Z(t) \geq H_{min}$ 。当水位差不能再保持 H_{min} 时，发电阶段终止，等待下一个循环的充水阶段。

为缩短等待时间并多利用库容多发电，有些潮汐电站配置抽水设施。抽水设施在等待阶段开启，用电力系统的电力抽海水入库， $z(t)$ 因而继续升高 [见图 1(c)]，高于高潮位。抽水设施可以是另设水泵，但一般是与发电设备结合在一起、抽水和发电共用的可逆式机组（见水泵水轮机和抽水蓄能发电电动机）。

单向电站一般采用落潮发电而不采用涨潮发电。采用落潮发电时 $z(t)$ 总高于 $Z(t)$ 或与 $Z(t)$ 齐平，而采用涨潮发电时 $z(t)$ 总低于或与 $Z(t)$ 齐平。可见落潮发电方式利用水库较上部的库容，而涨潮发电方式利用水库较下部的库容。利用较上部库容有两个优点：①上部库面积大，可利用的库容也大，可增加发电量；②上部库容不易被淤积。

(2)单库双向电站。建一个水库，落潮和涨潮时都发电，比单向电站可增加发电量约 25%。但为能双向发电须采取技术措施。或采用正、反双向水流都能发电的机组，或改变水工建筑物布置 [见图 2(a)]，使涨潮和落潮时水流都按同一方向通过机组发电。单库双向电站的运行分为 6 个阶段，即涨潮时的等待、发电、进水阶段和落潮时的等待、发电、泄水阶段。当没有抽水设施时运行过程如图 2(b)，有抽水设施时如图 2(c)。

单库双向电站和单库单向电站都存在间歇性发电的缺点，双向电站只是发电时间相对长些。因间歇性发电，发电时间可能与用电负荷的高峰时间不一致，所以电力系统不得不为此重复设置火电站装机容量以弥补潮汐电站电力不足。另外系统的火电站为配合潮汐电站时发时停的过程，势必扩大出力变化幅度，将影响火电机组的可靠性和使用寿命，增加燃料消耗。

(3)双库电站。为避免间歇性发电，建有两个互相邻接的水库，分别用泄水闸与海相通，见图 3(a)。一个是高水库，在潮位 $Z(t)$ 涨到与 $z(t)$ 齐平时开启泄水闸，注海水入库以抬高库水位，直到达到高潮位时关闭泄水闸。另一个是低水库，在 $Z(t)$ 落到与低水库库水位 $z'(t)$ 齐平时开启泄水闸，排库水出海，直到降至低潮位时为止，关闭泄水闸。厂房设在两库之间，用两库的水位差 $H = z(t) - z'(t)$ 发电，见图 3。

水能计算及装机规模选择 因潮汐潮位变化规律性强，且每个太阴月的变化过程基本相同，所以用一个太阴月的潮位资料计算潮汐电站的出力过程和时段电

量就可以较全面地反映电站效益。当拟定了电站的装机容量、机组的发电最小水头（据此确定发电阶段的历

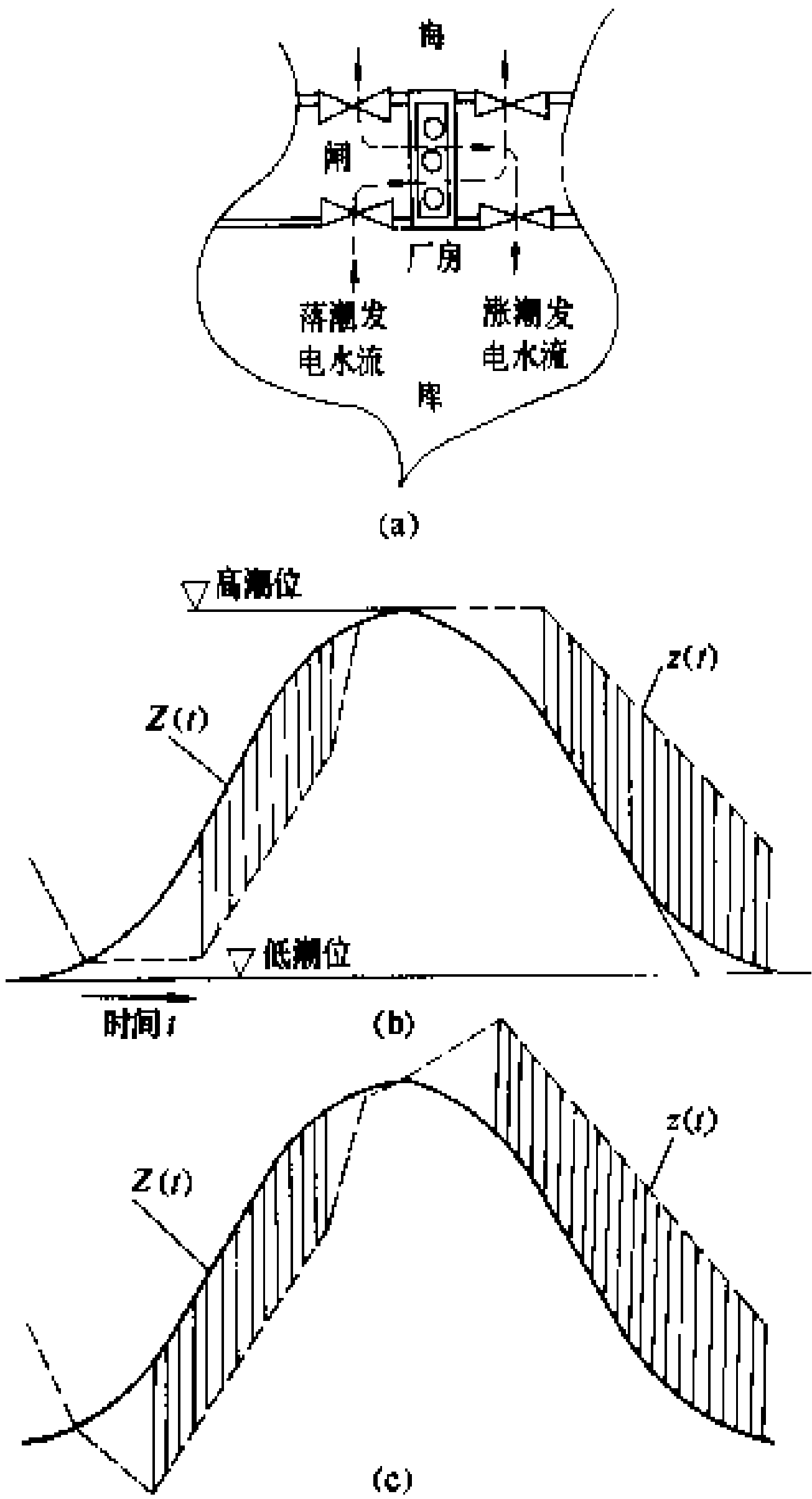


图 2 单库双向电站
(a) 开发方式；(b) 无抽水功能；(c) 有抽水功能

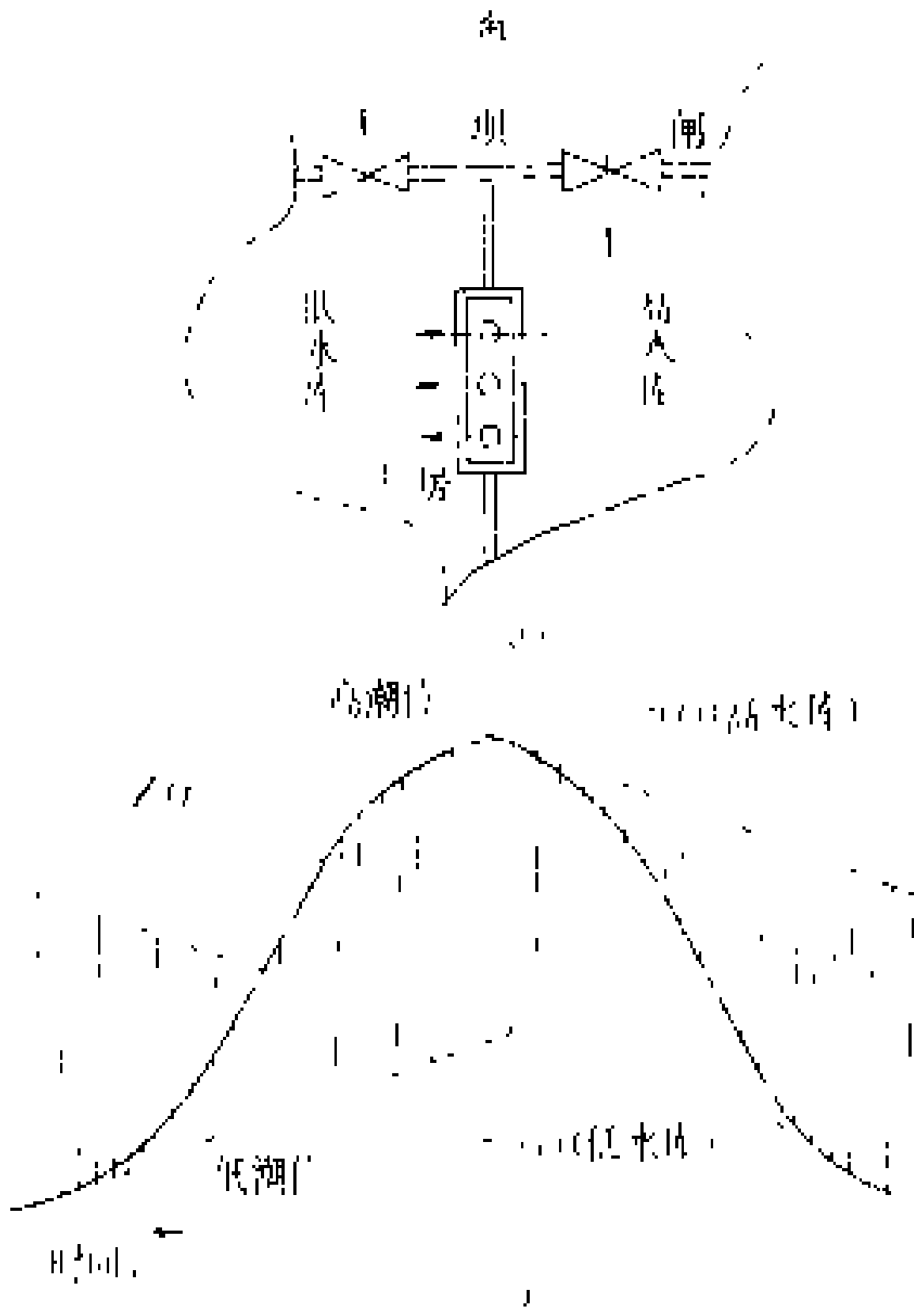


图 3 双库电站
(a) 开发方式；(b) 运行方式

时)、抽水设施的抽水能力（据此确定等待阶段的历时）和泄水闸的泄水能力（据此确定泄水阶段的历时）后就可据潮位变化和库容曲线进行径流调节计算，计

chen

算出单位时段的 $z(t)$ ，流量 $Q(t)$ 和水头 $H(t)$ 的过程，再计算 $P(t)$ 过程

$$P(t) = \frac{\rho \times g}{1000} \times Q(t) \times [H(t) - \Delta H] \times \eta$$

式中 $P(t)$ 为单位时段出力，kW； ρ 为海水密度，1026 kg/m³； g 为自由落体加速度，9.81 m/s²； ΔH 为水头损失，m； η 为机组效率。在一个太阴月 (T 小时) 内潮汐电站的发电量为

$$E = \int_0^T P(t) dt$$

潮汐电站的坝高一般据当地的潮差确定，库容据海湾或河口地形条件计算确定。电站的装机容量与 H_{\max} 、抽水能力、泄水能力的选择互相有关，所以这 4 项一般经过经济比较选定。

开发状况 世界各国都尚未大力开发潮汐电站。法国朗斯(Rance)潮汐电站是已建成的潮汐电站中装机规模最大的潮汐电站，装 24 台单机 10 MW 机组，合计 240 MW。加拿大安娜波利斯(Annapolis)潮汐试验电站是单机规模最大的潮汐电站，单机 17.8 MW。据中国潮汐能资源普查，全国可能开发潮汐电站 191 处，可装机 21580 MW，年发电量 619 亿 kW·h。但已建潮汐电站不到 10 处，其中以福建省的江厦潮汐电站的装机规模最大，装 6 台 500~700 kW 机组，总装机 3900 kW，单库单向发电，年发电量 1100 万 kW·h。

(曾学敏)

chenshachi

沉沙池 (settling basin) 位于进水口下游，用以沉淀进入引水道泥沙的水工建筑物。它是多泥沙河流上开敞式进水口的防治泥沙的设施。开敞式进水口的上游多无沉积泥沙的库容，取水时虽经设在进水口前拦沙坎拦截了大量的推移质，但悬浮质和少量跳跃的推移质仍会进入水道。较粗泥沙将沉淀在引水道中，减少过水断面；细粒泥沙则随水流进入水轮机，磨损其部件，降低机组效率。因此，在进水口后或引水道的适当位置设沉沙池。沉沙池的断面远大于引水道断面，并有足够的长度。水流流经沉沙池流速降低，使得水流中有害的泥沙颗粒沉淀到池底，沉沙后的水流继续流入引水道进入水轮机。沉淀的泥沙由排沙廊道排出。

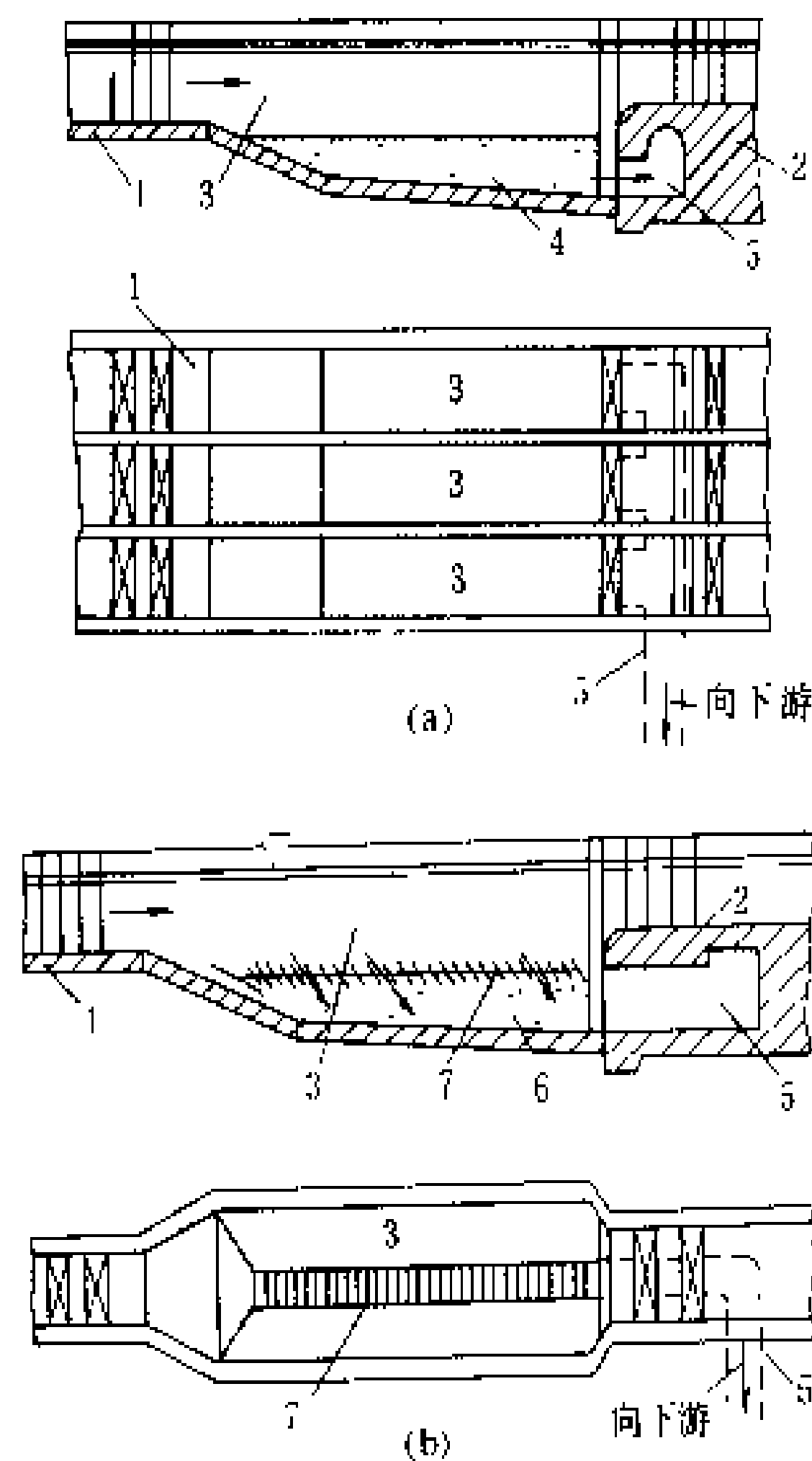
水流中含沙量大于 0.5 kg/m³，或所含对水轮机有害颗粒超过 0.2 kg/m³，均需要设置沉沙池。有害颗粒是指粒径大于 0.25 mm 的硬颗粒(如石英)和粒径大于 0.4 mm 的软颗粒。含沙量大的水流，即使粒径为 0.1~0.05 mm 的较细颗粒，对水轮机的磨损也是严重的。

沉沙池有定期冲洗的和连续冲洗的两类。

定期冲洗的沉沙池 沉沙池主要由进口扩散段、沉淀室、出口收缩段、冲沙廊道及进、出口的节制闸门组成，见图 (a)。扩散段与收缩段分别和沉沙池的上、下游的引水道相接，其作用是使通过沉沙池的水流得以均匀扩散和收缩，以免不利的流态影响沉沙的效果。为了缩短扩散段的长度，可在其中设置分流墩或静水格栅，强制泥沙均匀扩散。根据电站的引用流量的大小和运行的要求，可选用单室或多室的沉沙池。一般要求水流在沉淀室中流速要降低到 0.2~0.5 m/s，再根据引用流量和预留的淤沙容积确定沉淀室的断面尺寸，并要求有足够的长度，以使有害泥沙颗粒随水流流动有充分时间沉降到池底。具有正坡的沉沙池，排沙廊道位于池的末端。

当泥沙淤满沉淀室的预留容积后，室中流速增大，有可能将有害颗粒带至下游引水道时，开启排沙廊道冲洗排沙。具体作法是：关闭沉沙池的进、出口节制闸门，停止通过它向下游引水道供水；开启冲沙廊道的闸门，放空池内积水；局部开启进口节制闸门，利用闸门下的高速射流，将沉沙冲起，由冲沙廊道排放出去。多室沉沙池，可在不停止向引水道供水的条件下，定期分室轮流冲洗。除利用水力冲沙方法外，还可直接使用吸泥泵抽排淤沙，而不必设置节制闸门和冲沙廊道。

连续冲洗的沉沙池 沿池的纵向将底板做成连续



沉沙池示意图

(a) 定期冲洗沉沙池；(b) 连续冲洗沉沙池

1- 进口底坎；2- 出口底坎；3- 沉淀室；4- 死池容；

5- 冲沙廊道；6- 集沙排沙廊道；7- 格栅

的漏斗,在其下方设置小断面的集沙排沙廊道。廊道顶部用孔板或格栅将廊道与沉淀室分开,见图(b)。当水流通过沉沙池时,廊道内形成流速较大的压力流,因此在流速较低的沉淀室中沉淀下来的泥沙,能通过孔板或格栅进入廊道,再随压力水流排出。这种沉沙室不设节制闸门,也不停水,但耗水较多。

(丁志华)

chengya shui

承压水 (confined water) 充满于上下隔水层之间具有承压性质的地下水。当井(孔)揭穿隔水层后,受压的水便会上升至含水层顶板以上某一高度,其稳定水位即为承压水位。当承压水位高出井(孔)口,就成为自流井。有的承压含水层被沟谷揭露后,就会自流溢出地面,称为自流水。承压水的形成主要取决于地质构造,在适当的地质构造条件下,无论是孔隙水、裂隙水或喀斯特水均可形成承压水。

承压水蓄水构造类型 有向斜蓄水构造、单斜蓄水构造及脉状蓄水构造3类。①向斜蓄水构造又称自流盆地,可以划分为补给区、承压区及排泄区。②单斜蓄水构造,又称自流斜地,是由于岩性相变或断层切割所致,补给的水在深部无排泄出路而回流于补给区附近排泄。若断层导水性好,承压水可通过断层以上升泉形式排泄于地面。③脉状蓄水构造,一类是由分布高处的裂隙岩体,吸收了大气降水或地表水,在重力作用下,使深部的裂隙水具有承压性质;另一类是由于岩石圈深处上升的气体压力所造成,如沿深大断裂或侵入接触带上升的高气化热水。

承压水与经济建设 承压水的水位、水量及水质受气候影响不显著,一般不易受到污染,常成为良好的供水水源。但是承压水对采矿或工程建设,往往带来严重的威胁或不利的影 响,在水电工程建设中要考虑基坑下的承压水冲溃基坑底板的可能性以及裂隙承压水引起坝基扬压力的增高。

(邹小安)

chongshi shuilunji

冲击式水轮机 (impulse turbine; Pelton turbine) 利用具有压力能和动能的高速水流直接冲击转轮的轮叶做功,将水流的能量转换为机械能的水轮机。按水流冲击转轮的部位和方向区分,冲击式水轮机可分为水斗式(又称切击式)、斜击式和双击式;按水轮机轴的布置方式可分为卧式和立式。斜击式和双击式水轮机由于效率低、使用水头有限,只用于小型水电站。水斗式水轮机应用最为广泛,是冲击式水轮机中最具有代表性的机型,其使用水头范围一般在300 m

以上。对于300~700 m水头范围,在选择机型时需要对混流式和冲击式两种机型进行全面的技 术、经济论证后优选确定。水头高于500 m时,一般采用水斗式水轮机。

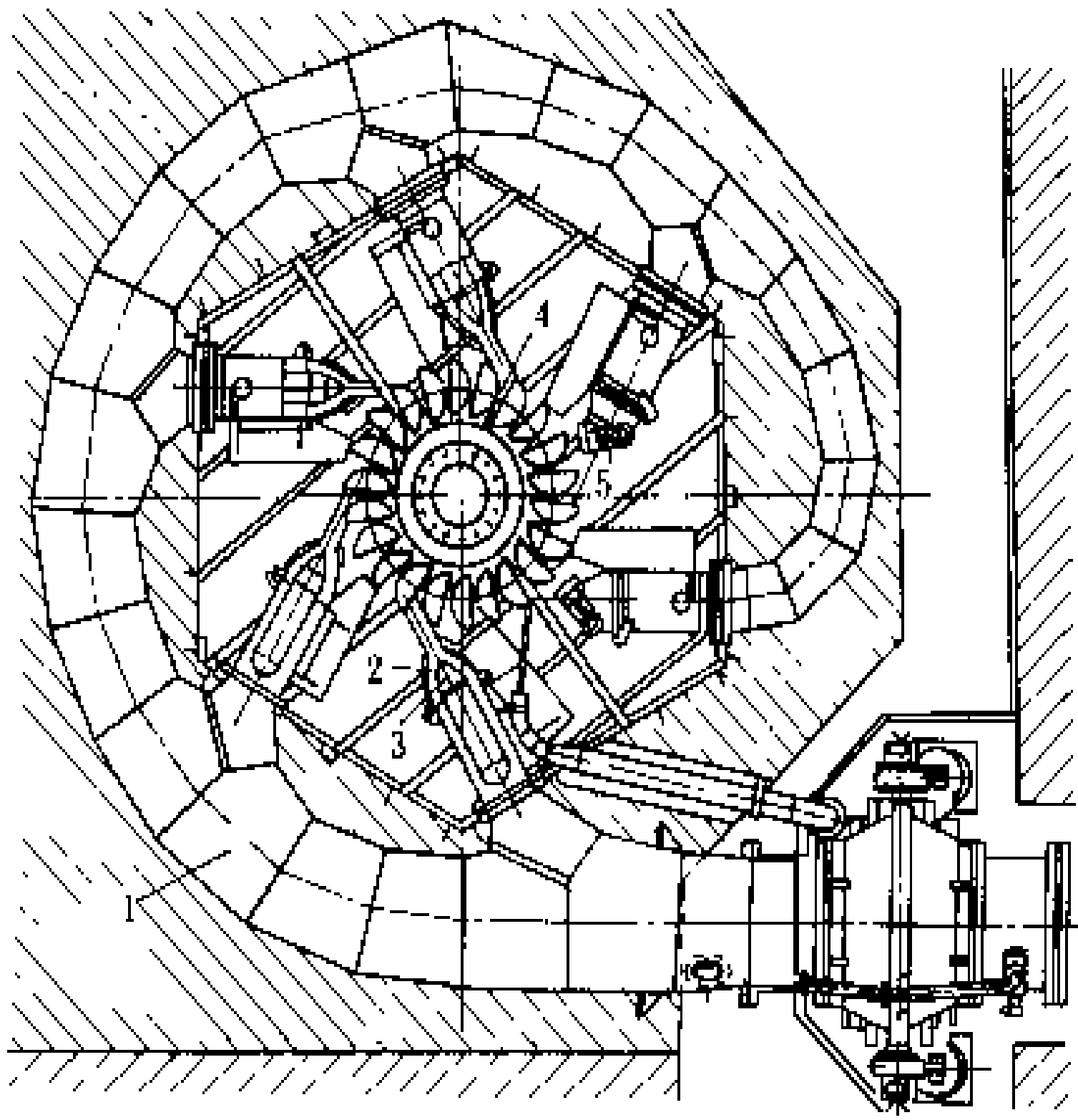


图1 水斗式水轮机结构图

1—输水管;2—喷嘴;3—喷针;4—转轮;5—折向器

水斗式水轮机 水斗式水轮机的主要部件有:输水管(亦称配水环),为引水部件;喷流机构,包括喷嘴、喷针及其操作机构,用以调节流量和功率;转轮,由轮盘和沿其圆周均匀布置的水斗式轮叶组成;折向器亦称偏流器,用以在负荷骤减时迅速隔断水流。

水斗式水轮机的结构如图1,转轮结构见图2。

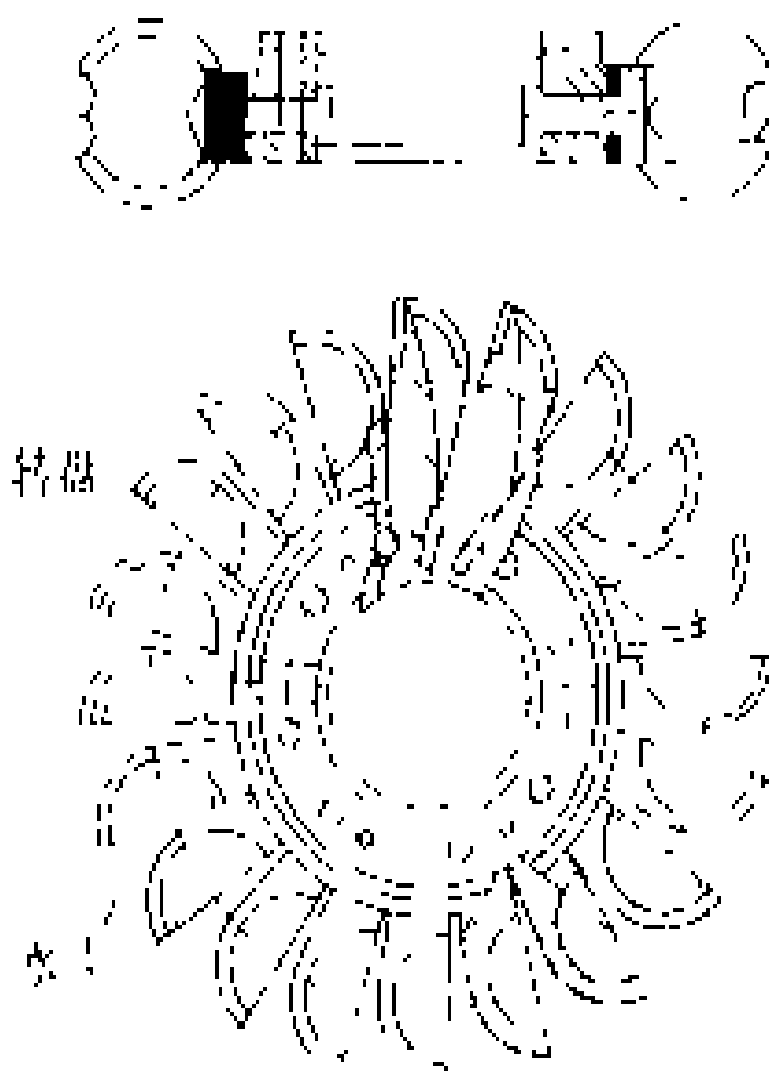


图2 水斗式水轮机转轮结构图

斜击式水轮机 喷嘴的射流方向不在转轮的旋转平面上,而是成某一角度(α),此角一般为 $22^\circ\sim 25^\circ$,见图3。斜击式水轮机的适用水头一般在400 m以下,转轮结构比较简单,多用于中小型水电站。

双击式水轮机 水流向心地射向转轮并充满部分叶片的流道后,再离心地射到另一部分叶片上,前者利用70%~80%的动能,后者利用动能的20%~30%。由于水流两次冲击到叶片上,因而称为双击式水轮机,如图4所示。

发展简史及趋势 1880年,美国人L. A. 佩尔顿(L. A. Pelton)首次提出一种双曲面型水斗式水轮机,

chong 冲

经不断改进，成为现代的类型，亦称为佩尔顿式水轮机。

近年来，随着水轮机技术的进步，冲击式水轮机的应用日益广泛。其使用的水头已达 1000 m 以上，喷嘴的数量也随之增加，大型水斗式水轮机的喷嘴数已达 6 个之多。发展趋势是提高单个喷嘴的比转速和继续增加喷嘴的数量，以适应更高水头电站的需要。

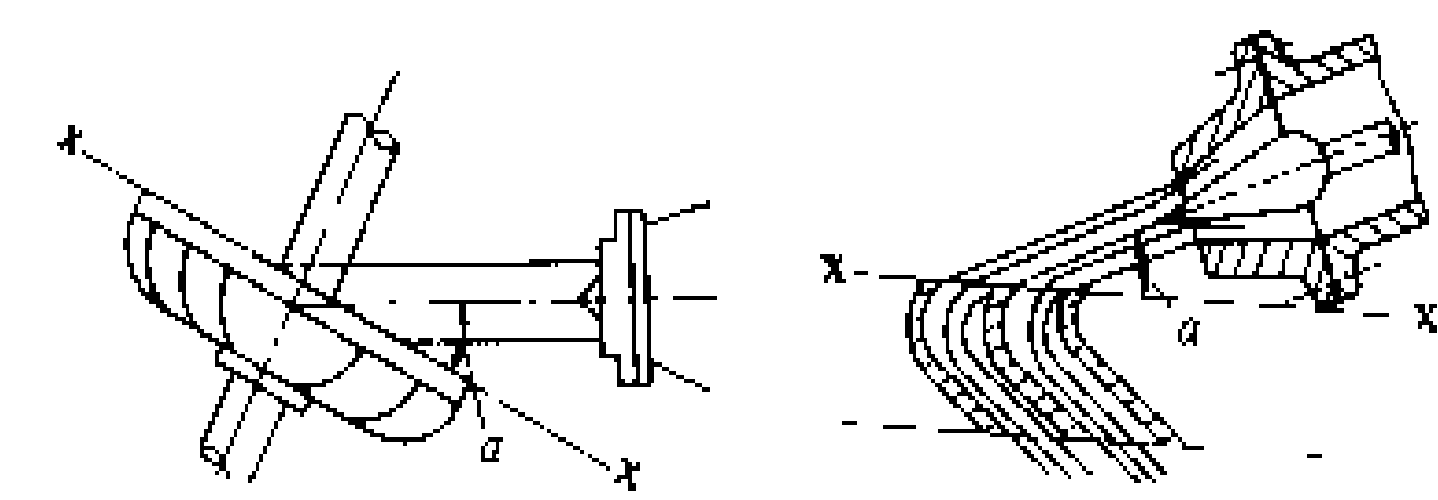


图 3 斜击式水轮机射流斜击转轮示意图

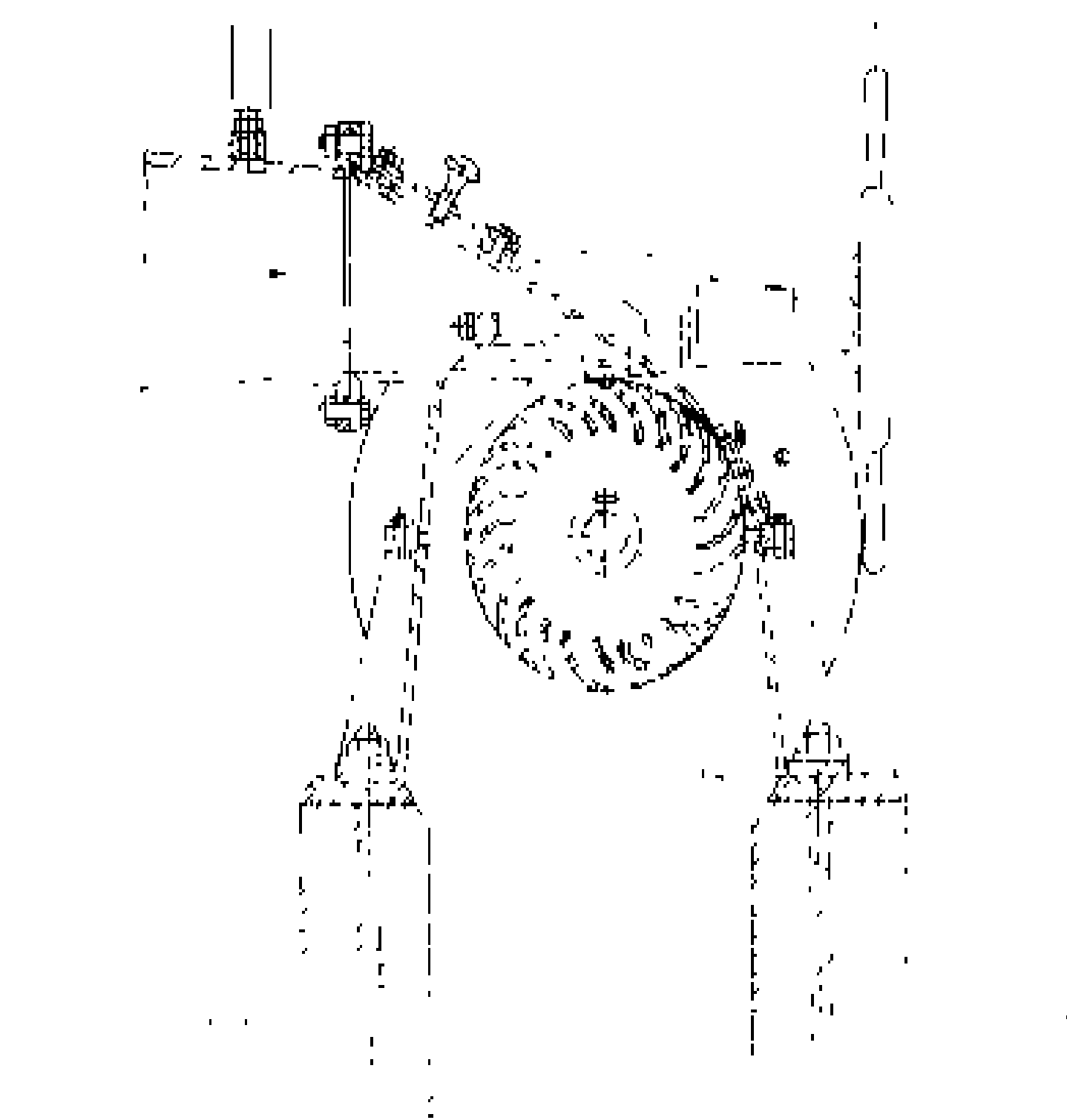


图 4 双击式水轮机示意图

目前，使用大型水斗式水轮机最多的是欧洲，如挪威的西西马（Sy-sima）水电站的水斗式水轮机，单机额定出力为 315 MW，电站水头 885 m，转轮直径 5.1 m，立轴，6 个喷嘴。

中国水电站建设中，采用冲击式水轮机较少，已投入运行的、最大的水斗式水轮机为以礼河一级（盐水池）水电站，单机额定出力为 37.5 MW，最大水头为 629 m，双转轮，每个转轮 2 个喷嘴，由捷克斯洛伐克的斯柯达（SKODA）公司制造。国产的同类机组多为中小型，如四川磨坊沟水电站，其水斗式水轮机单机额定出力为 13 MW，最大水头 462 m，转轮直径为 1.7 m，2 个喷嘴。

（史毓珍）

chongshazha

冲沙闸（scouring sluice） 開啟式进水口的

冲沙建筑物。它紧靠进水口，与泄水闸或溢流堰组成壅水建筑物。

冲沙闸在结构上基本类同于进水闸，由于水流含沙量大，其过水部分尤其是底板的材料要求具有较高的抗磨损性能，下游连接段设有消力池、海漫及护坡。

冲沙闸利用洪水期开闸放水冲沙。冲沙流量应选用每年汛期出现次数较多的洪水流量，以便能年年放水冲沙，保持主河槽稳定在水电站进水口前。冲沙闸底板高程一般取枯水期河床平均高程，常比进水口底板低 1.0~1.5 m。底板过高会冲刷下游，底板过低又易使下游淤积。

（丁志华）

choushui xu'eng dianzhan

抽水蓄能电站（pumped storage power station） 利用电力系统低谷负荷时的剩余电力抽水到高处蓄存，在高峰负荷时放水发电的水电站。抽水蓄能电站是电力系统唯一的填谷调峰电源。图 1 为抽

水蓄能电站是电力系统唯一的填谷调峰电源。图 1 为抽

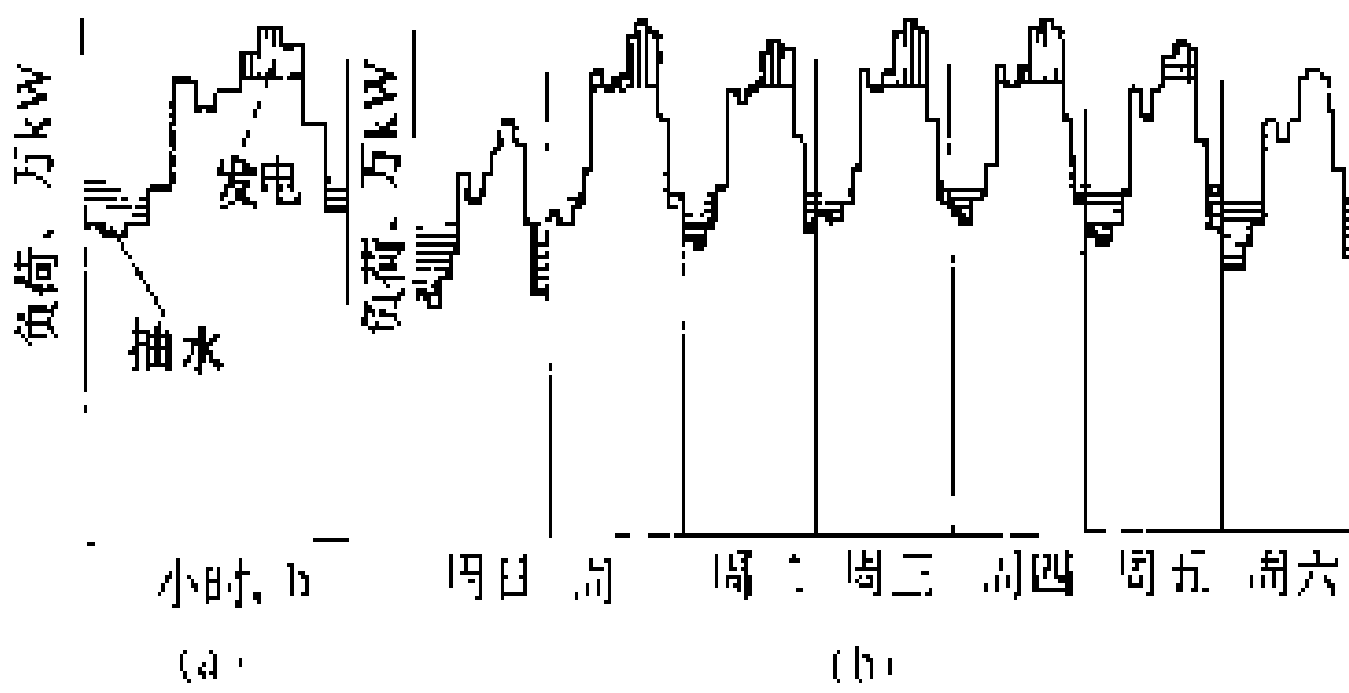


图 1 抽水蓄能电站运行过程图

（a）日运行过程；（b）周运行图

水蓄能电站在日、周负荷图上的运行过程。在负荷低谷时，吸收电力系统的有功功率抽水，这时它是用户。在负荷高峰时，向电力系统送电，这时它是发电厂。常规水电机组和燃气轮机组也是调峰性能较好的电源，但都没有填谷作用。抽水蓄能电站抽水是把电能转换为水能的过程；发电是把水能转换为电能的过程。在每一次抽水-发电的能量转换循环中，都有能量损失，使发电量小于抽水的耗电量，二者之比是抽水蓄能电站循环效率，或称抽水蓄能电站综合效率，一般为 0.7~0.75。抽水蓄能电站与火电、核电配合运行，因其填谷作用，可节省火电机组低出力运行的高燃料耗费和机组起停的额外燃料耗费，减少火电机组开停机次数，使核电站平稳运行，因而增长火电和核电机组运行寿命。在以火电、核电为主的电力系统中，修建适当比例的抽水蓄能电站还是经济的。抽水蓄能电站有起停灵活、增减工作出力快的优点，从全停到满载发电约 5 min，从全停到满载抽水约 8 min，从满载发电或满载抽水到与电网解列约 1 min。此外，抽水蓄能电站还可承担电力系统的负荷备用、事故备用和调频、调相任务。所以，

抽水蓄能电站不但可提高电力系统运行的经济性,且有助于降低系统事故率、提高供电可靠性。20世纪50年代以后,抽水蓄能电站发展很快。1950年世界各国抽水蓄能电站装机容量总计1600 MW,1960年为3420 MW,1970年为16640 MW,1980年为46520 MW,1990年为80680 MW。每10年内的平均年递增率分别为7.89%,17.14%,10.8%和10.6%。

类型 按开发方式、调节周期和机组类型等3种情况分类。

(1)按开发方式可分为纯抽水蓄能电站、混合式抽水蓄能电站和调水式抽水蓄能电站3类。

纯抽水蓄能电站原理见图2(a)。其上水库没有(或几乎没有)天然径流来源,其发电量全部来自抽水蓄存的水能。发电的水量等于抽水蓄存的水量,重复循环使用。仅需少量天然径流,补充蒸发和渗漏损失。补充水量既可来自上水库的天然径流来源,也可来自下水库的天然径流来源。如美国的勒丁顿(Ludington)抽水蓄能电站,其上水库在密执安湖东岸不远处的山顶上,用高52 m,长9.6 km的土堤围成。下水库为密执安湖,装机容量1872 MW。

混合式抽水蓄能电站原理见图2(b)。厂内既设有抽水蓄能机组,也设有常规水轮发电机组。上水库有天然径流来源,既可利用天然径流发电,也可从下水库抽

水蓄能发电。其上水库一般建于河流上,下水库按抽水蓄能需要的容积觅址另建。如中国的潘家口抽水蓄能电站。装机容量420 MW,装有1台单机容量为150 MW的常规机组和3台单机容量为90 MW的抽水蓄能机组,平均年发电量6.2亿kW·h,其中3.89亿kW·h为天然径流发电量,2.31亿kW·h为抽水蓄能发电量。

调水式抽水蓄能电站原理见图2(c)。上水库建于分水岭高程较高的地方。在分水岭某一侧拦截河流建下水库,并设水泵站抽水到上水库。在分水岭另一侧的河流设常规水电站从上水库引水发电,尾水流入水面高程最低的河流。这种抽水蓄能电站的特点是:①下水库有天然径流来源,上水库没有天然径流来源。②调峰发电量往往大于填谷的耗电量。如中国湖南省慈利县慈利跨流域抽水蓄能工程,见图3。设水泵站从沅江支流白洋河上源渠溶溪引水至赵家垭水库,年抽水1670万m³。赵家垭水库后设3级水电站共12300 kW,尾水流入澧水支流零溪河,年抽水用电量340万kW·h,年发电量1390万kW·h。

(2)按水库的调节周期可分为日调节、周调节和年调节3类。日、周调节抽水蓄能电站的运行方式见图1,这类电站大多为纯抽水蓄能电站。年调节抽水蓄能电站的运行方式为:在汛期多抽水、少发电,在枯水期多发电、少抽水。

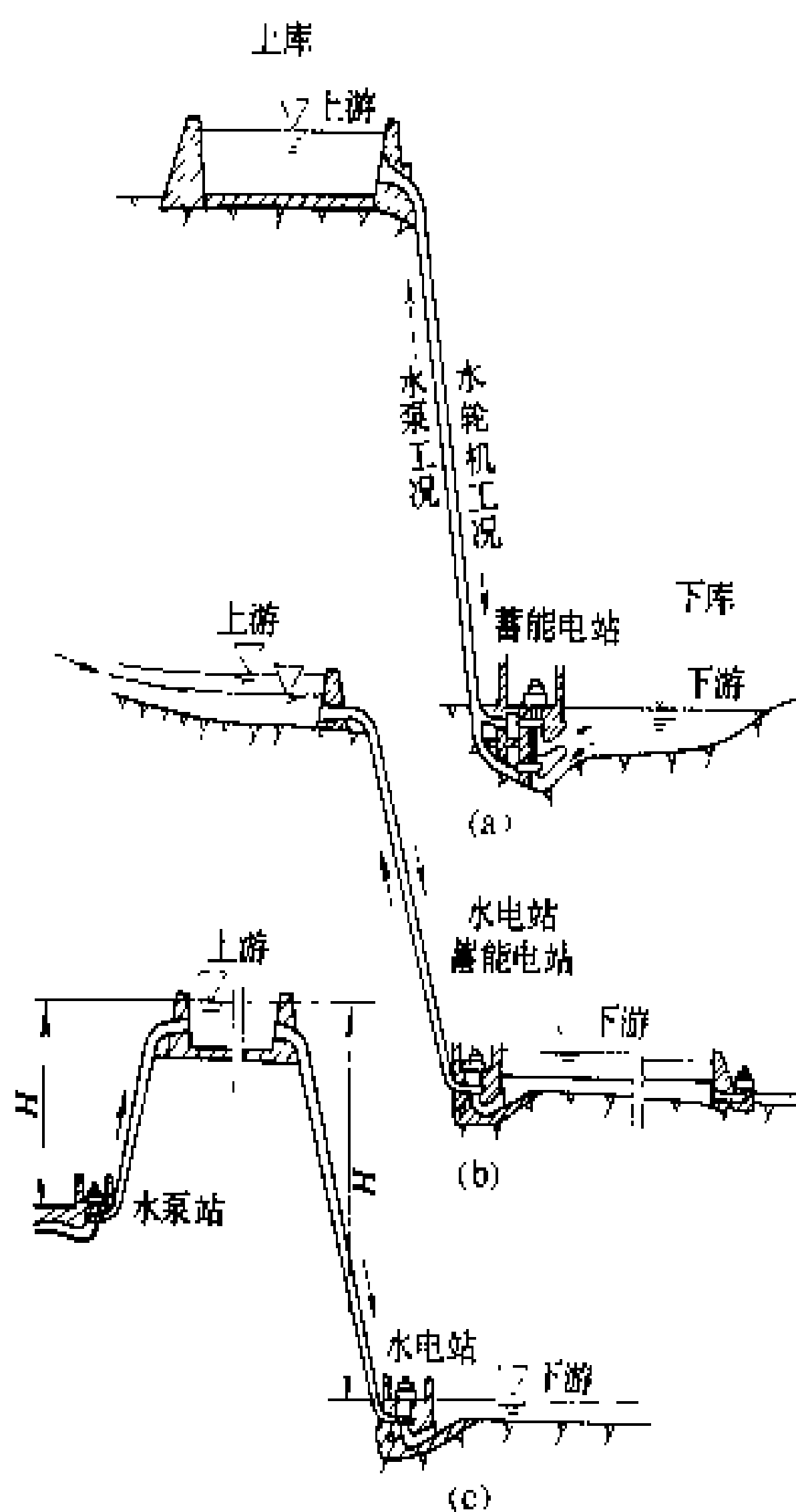


图2 抽水蓄能电站类型图

(a) 纯抽水蓄能; (b) 混合式; (c) 调水式

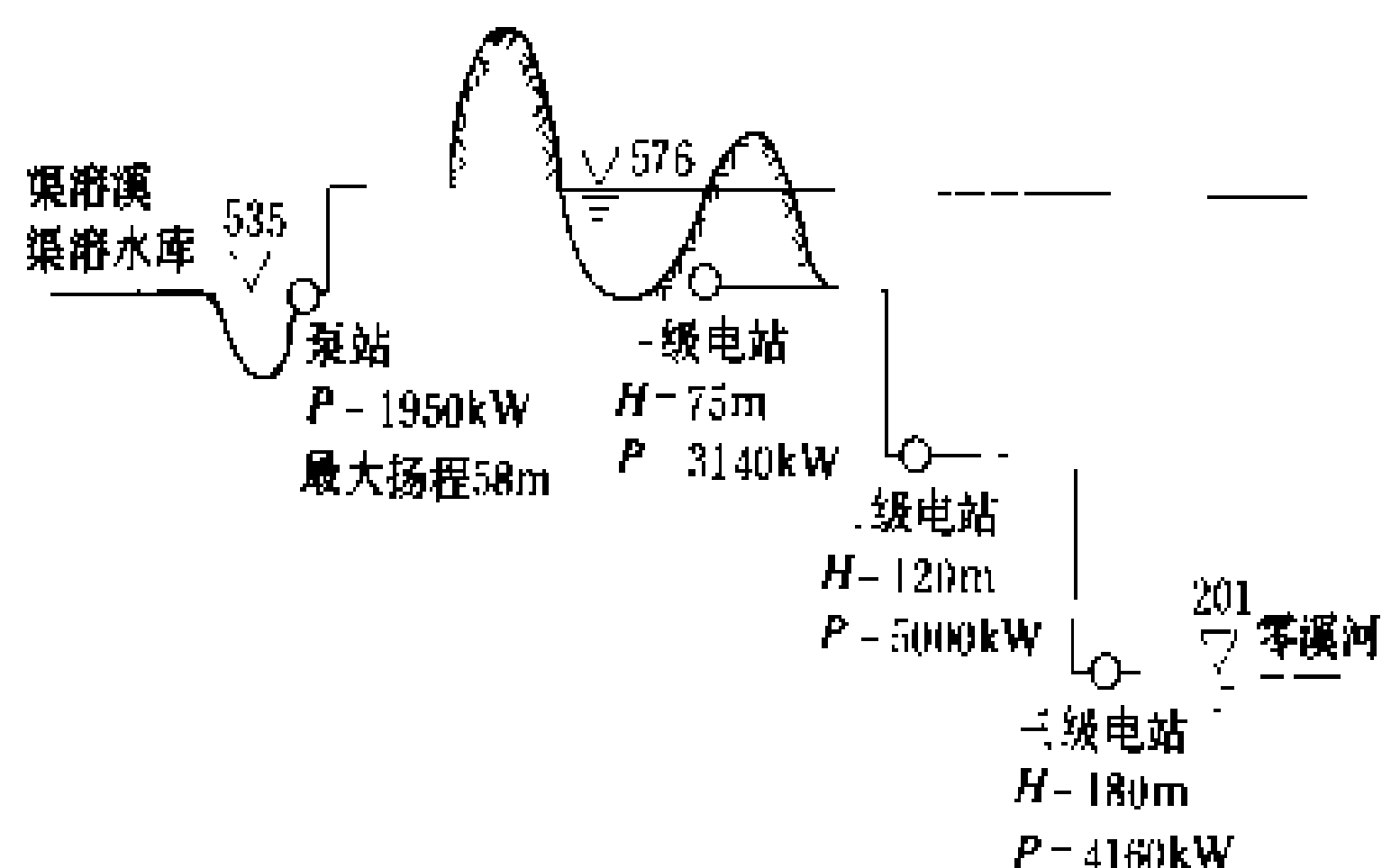
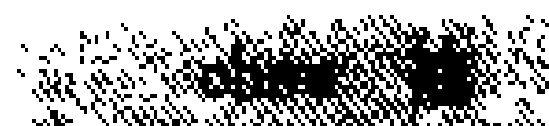


图3 慈利跨流域抽水蓄能工程剖面示意图

(3)按机组型式可分为:①四机式。厂内分设两套机组,一套由水泵和电动机组成,供抽水用;另一套由水轮机和发电电动机组成,供发电用。②三机式。厂内安装由同轴水泵、水轮机和发电电动机组成的机组。③二机式。厂内安装的机组由水泵水轮机和发电电动机同轴组成,也称可逆式机组。正向运行发电,反向运行抽水。

电站组成 抽水蓄能电站主要由上水库、下水库、引水系统、厂房、抽水蓄能机组和开关站等部分组成。

(1)上水库和下水库。上水库的高程高于下水库,其作用在于把提高了高程的水体蓄存起来,达到蓄能的目的。下水库的作用在于蓄存发电下放的水量,不使



流失,以便再度将其泵入上水库进行蓄能。上水库可以利用已建水库或天然湖泊,也可新建。下水库除可利用已建水库、天然湖泊或新建外,也有利用海洋或河道作下水库的情况。中国台湾省的明湖抽水蓄能电站和在建的明潭抽水蓄能电站,都是利用天然湖泊日月潭作为上水库。英国狄诺维克抽水蓄能电站的上下水库都是筑坝壅高天然湖泊水位形成的。

上下水库间的高程差愈大,电站水头愈高,对同等规模的电站而言,所需水库库容愈小,流量愈小,水工建筑物的工程量相应减小,造价降低,机组设备的投资也有所降低。上、下水库间的输水道(包括上游引水道和下游原水道)愈短,则输水系统工程量和损失愈小,工程造价和运行费用都会降低。可用输水道长度(L)与水头(H)之比来粗略衡量其经济性,许多抽水蓄能电站的 L/H 都小于10。对于新建的上水库或下水库,防渗漏是一个重要问题,需妥善处理。

(2) 输水系统。包括两部分:在上水库和厂房之间的为引水部分;在厂房和下水库之间的为尾水部分。引水部分包括进(出)水口、引水道和上调压室。引水道或者是压力隧洞,或者是压力管道。引水道和调压室的构造均与常规水电站相同。进(出)水口,发电时为进水口,抽水时为出水口,应按双向水流设计,既要防止出流时流速过大,分布不均,引起拦污栅振动破坏,又要防止进流时产生吸气漩涡。压力管道的岔管,也要考虑双向水流,使损失最小。尾水部分如果过长,须设下调压室,其进(出)水口也应按双向水流设计。

(3) 厂房。抽水蓄能电站的厂房有地面厂房和地下厂房。由于水泵和可逆式机组的吸出高度为较大的负值,一般可达 $-25\sim-70\text{ m}$,因而多数纯抽水蓄能电站都是地下厂房。混合式抽水蓄能电站,装有两种机组,抽水蓄能机组的安装高程低于常规机组很多,故布置上较为复杂。也有把抽水蓄能机组和常规机组分别布置在两个厂房里的,如法国的大屋抽水蓄能电站把4台常规机组布置在地面厂房内,把8台可逆式机组布置在地下厂房内。

(4) 抽水蓄能机组。分为四机式、三机式和可逆式(二机式)3种。现在使用最多的是可逆式机组。其水泵水轮机,正向运行时为水轮机,反向运行时为水泵。因一机两用,两种工况难于都达到最优,为获得较高效率,汽蚀系数可能大些,吸出高度的负值也大些。发电电动机要变方向旋转,故在工况变换时要改变相序。可逆式机组两种工况的运行转速也可能不同,如果用两种转速,电动发电机要变换极对数。作为同步电动机还有起动问题。(见水泵水轮机、抽水蓄能发电电动机和抽水蓄能机组起动方式)

(5) 开关站。1000 MW 以上的抽水蓄能电站,一

般用超高压输电线路连接到负荷中心,这样可以用较少输电回路满足要求。即使距负荷中心很近也是如此。苏联扎戈尔斯克抽水蓄能电站,总装机1200 MW,用500 kV 超高压输电线路接入莫斯科地区电力系统,所需线路长度只有15 km。又如中国广州抽水蓄能电站,一期装机1200 MW,距广州90 km,用2回500 kV 输电线路接入系统。超高压开关站一般为屋外式或气体绝缘金属封闭电器。

发展简史 瑞士苏黎世的奈特拉抽水蓄能电站建于1882年,是世界上最早的抽水蓄能电站,该电站抽水扬程153 m,容量515 kW,是一座年调节抽水蓄能电站。20世纪50年代以后,随着核电站和大容量火电机组大批投产,为提高电力系统电源的调峰能力和减少调峰费用,兴建了许多抽水蓄能电站。电站的技术水平也不断提高。机组由四机式发展到二机式(可逆式)。单级机组可适用的水头逐渐增大,如保加利亚的茶拉(Chaira)抽水蓄能电站的单级混流可逆式机组的抽水扬程已达701 m。利用水头最高的是奥地利的赖斯采克(Reiszeek)抽水蓄能电站,采用四机式机组,水头1773 m。单站规模也不断增大,根据《国际水力发电及坝工建设》1990年第4期资料,世界上单站规模超过1000 MW 的抽水蓄能电站已投入运行的有32座,其中日本10座、美国7座、意大利4座、中国(包括台湾省)3座。单站规模最大的是美国的巴斯康蒂(Bath-Country)抽水蓄能电站,装机容量 $6\times 350\text{ MW}$ 。单机规模最大的是美国腊孔山(Mt. Raccoon)抽水蓄能电站,单机容量383 MW,共装4台,水泵水轮机的效率也最高,发电工况最高效率为93.5%,水泵工况的最高效率为92.5%。

中国抽水蓄能电站建设起步较晚。1968年在岗南水库安装了第一台斜流可逆式机组,由日本制造,单机11 MW。1975年在密云水库安装了2台中国制造的单机11 MW 的可逆式机组,转轮直径2.5 m,最大水头64 m。1989年潘家口抽水蓄能电站的第一台机组投产,单机90 MW。全电站共安装3台可逆式机组和1台单机150 MW 的水轮发电机组。广州抽水蓄能电站一期($4\times 300\text{ MW}$)已发电,在建的有十三陵抽水蓄能电站($4\times 200\text{ MW}$)、天荒坪抽水蓄能电站($6\times 300\text{ MW}$)和广州抽水蓄能电站二期($4\times 300\text{ MW}$)等。台湾省已投运的有明湖抽水蓄能电站($4\times 250\text{ MW}$),在建的有明潭抽水蓄能电站($6\times 267\text{ MW}$)。

(曹学敏)

choushui xu'nerg fadian - diandongji

抽水蓄能发电电动机 (generator/motor for pumped storage power station) 既可作发

电机发电又可作电动机带动水泵抽水的同步电机。发电电动机要适应发电、抽水、调相（包括正、反两种旋转方向）等运行工况及各种运行工况间转换的要求，且工况转换快速而频繁，每天通常起停 2~3 次。发电电动机性能应兼顾发电机和电动机两种工况运行要求，可逆式水泵水轮机同轴连接的发电电动机结构应适应正、反向旋转。

结构和性能特点 有以下几个方面。

(1)由于频繁起停，结构上承受的电磁作用力、机械作用力及温度应力的变幅都较大，要求具有足够的强度、刚度和耐疲劳强度。

(2)当水泵工况的起动方式采用异步起动时，要求转子阻尼绕组具有良好的耐热和机械性能。采用同轴小电机起动时要注意轴系的振动。

(3)与可逆式水泵水轮机同轴连接的发电电动机要适应正、反两个方向旋转的运行要求，因此推力轴承瓦的支撑应是对称的，润滑油的供应和循环要考虑双向工作需要。

(4)通风冷却系统也要考虑适应正、反两个方向旋转的特性。

(5)发电电动机转速一般较高，转动惯量较小，定子铁芯长度较大。

(6)为提高电机的材料利用率，降低造价，设计时应尽量使发电容量与抽水功率相接近。

(7)在电站水头变幅范围较大的条件下，为扩大水泵运行工况下高效率的工作区，水泵水轮机有采取变速运行的做法。此时发电电动机要采取改变转子磁极对数等措施，以适应变速运行。

发展简史 抽水蓄能电站虽然已有近百年的历史，但早期蓄能电站使用的是独立工作的水泵电动机组和水轮发电机组。后来出现了将水泵、水轮机与一台兼作电动机和发电机联接在一起而形成的三机式机组，才出现了发电电动机，在两种工况下具有相同的旋转方向。随着水轮机制造技术的发展，出现了将水泵水轮机合为一体的可逆式水泵水轮机，又出现了在两种工况下具有不同旋转方向的发电电动机。至今已投运的发电电动机单机额定容量达到 390 MV·A，最大容量为 447 MV·A，装在美国巴斯康蒂抽水蓄能电站。中国第一台抽水蓄能发电电动机于 1965 年投入运行，额定容量 15 MV·A，装在河北省岗南抽水蓄能电站。1992 年已投运的单机容量为 90 MV·A 机组，装于河北省潘家口抽水蓄能电站。单机额定容量最大的为 333 MV·A 机组，于 1993 年在广东省广州抽水蓄能电站投产。一些大容量发电电动机的主要参数见表。

大容量发电电动机的主要参数

国 名	电站名称	机组型式	发电机工况		电动机工况		额定电压 (kV)	额定频率 (Hz)	额定转速 (r/min)	转动惯量 (t·m ²)	起动方式	投运日期	制造厂
			(MV·A)	cosφ	(MW)	cosφ							
日 本	今 市	伞	390	0.9	361	0.95	15.4	50	428.6	7100	C	1988	东芝
美 国	赫尔姆斯	伞	390	0.9	343	0.9	16	60	360	10440	P	1984	西屋
美 国	勒丁顿	伞	388	0.85	388	0.85	20	60	112.5	140600	C,S	1973	日立
美 国	腊孔山	半伞	382	0.9	40.2 (最大)	1.0	23	60	300	10350	C,S	1978	西屋
美 国	巴斯康蒂	半伞	389	0.9	348	0.9	20.5	60	257	6250	C,S	1985	西屋
日 本	新高瀨川	半伞	367	0.9	330	0.9	18	50	214.3	27000	P,S	1979	东芝
瑞 典	杰克坦	伞	360	0.85	255		20	50	300		P	1978	ASEA
南朝鲜	三浪津	半伞	336	0.9	295	1.0	18	60	300	6500	P	1982	富士
日 本	玉 原	半伞	335	0.9	310	0.95	13.2	50	428.6	6500	C,S	1982	日立 三菱
美 国	贝尔斯万普	半伞	333	0.9	309	0.95	13.8	60	225	20560	P	1974	东芝
中 国	广 州	半伞	333	0.9	300	0.95	18	50	500	3300	C,S	1993	Alsthom
英 国	狄诺维克	悬	330	0.95	292	0.95	18	50	500		C,S	1982	GEC
日 本	南 原	半伞	326	0.95	350	1.0	20	60	257	16000	P	1976	日立
日 本	奥多多良木	半伞	320	0.95	314	1.0	18	60	300	12400	P	1974	日立
美 国	吉尔博	半伞	320	0.9	313	1.0	17	60	257	16200	P	1973	日立
日 本	俣野川	半伞	316	0.95	316	1.0	13.2	60	400		C,S	1986	日立
日 本	天 山	半伞	316	0.95	325	1.0	13.2	60	400		C,S	1986	日立
日 本	本 川	半伞	316	0.95	320	0.99	13.2	60	400	7500	C	1982	三菱
南斯拉夫	巴其那 帕斯塔	半伞	315	0.95	310	1.0	11	50	428.6	6000	S	1980	东芝
澳大利亚	威文霍	伞	312.5	0.8	245		13.8	50	120	82000	T	1983	三菱

续表

国 名	电站名称	机组型式	发电机工况		电动机工况		额定电压 (kV)	额定频率 (Hz)	额定转速 (r/min)	转动惯量 (t·m ²)	起动方式	投运日期	制造厂
			(MV·A)	cosφ	(MW)	cosφ							
奥地利	罗登达	伞	310	0.84	260		21	50	375	3910	P	1976	ELIN
日本	奥矢作Ⅱ	半伞	290	0.9	283	1.0	18	60	360		P	1981	日立
日本	奥津津	半伞	280	0.9	280	0.98	16.5	50	375		P	1977	日立
日本	下 乡	半伞	280	0.9	280	0.98	16.5	50	375	7000	C,S	1986	三菱
南非	德雷肯斯堡		280	0.9	280	0.98	11	50	375		P	1981	BBC
联邦德国	威 尔	卧	290	0.75	261	0.83	21	50	600	1900	T	1976	ELIN SIEMENS
中国台湾	明 湖	半伞	280	0.9	265	1.0	16.5	60	300	10000	P,S	1984	三菱
澳大利亚	因密特3	半伞	278	0.95	182.8	1.0	15.4	50	107.5	22400	T	1973	三菱
法国	切拉斯		270		246		15.5	50	300	7650	C	1974	Alsthom
日本	大 平	半伞	265	0.95	277	1.0	11	60	400	5900	P	1975	东芝
联邦德国	沃尔德克2	伞	265	0.9	240	0.9	15.75	50	400	1225	T	1975	AEG
日本	新丰根	半伞	250	0.95	260	1.0	16.5	50	250	15000	P,S	1975	日立 东芝
								60	257	14600			
日本	喜撰山	半伞	250	0.95	250	1.0	16.5	60	225	13500	P	1970	东芝
法国	蒙特济克	半伞	250	0.91	230	0.81	18	50	428.6	2400	C,S	1982	Alsthom
美国	卡斯泰克	伞	250	0.85	231	0.94	18	60	257.1	16810	S	1977	ASEA
南非	帕尔米脱	半伞	250	0.8	200	0.8	16.5	50	300		C	1988	富士
日本	昭 原	半伞	250	0.95	250	1.0	16.5	50	375	6500	P,S	1973	日立

* C—变频起动；P—小电机起动；S—同步起动；T—水轮机起动。

(邱景安)

choushui xu'nerg fadian - diandongji jidian baohu
抽水蓄能发电电动机继电保护 (relay protection of generator/motor for pumped storage power station) 检测发电电动机电气故障或异常运行工况,并发出保安操作指令或报警信号,以终止故障发展的自动化技术及装置。可逆式机组是当前抽水蓄能电站采用的主要机型,这种机组作发电工况运行时,其继电保护要求与水轮发电机继电保护一样,而作抽水工况运行时,除了为发电工况所配的继电保护装置需投入外,还要针对机组抽水工况的起动过程、电动机运行工况和电气主回路的相序变换等3种情况作特殊考虑。

抽水工况起动过程的继电保护 起动过程需考虑的保护:①要设置起动失败保护。根据不同的起动方式(见抽水蓄能机组起动方式)采取不同措施。对于异步起动方式或同轴小电机起动方式,起动时若机组在预定的时间未被拖动到规定的转速,这将出现发电电动机或同轴小电机长时间过电流,可利用这种现象来判明起动失败;对于同步起动则可设失步保护。②当采用同步起动时,在机组转速从零逐渐上升到额定值的过程中,机组始终处于励磁和带电状态,故继电保护应起作用。有些保护装置的动作值受频率影响很大,对在低频区内灵敏性很低的保护装置,要增设低频时能正确

反应机组事故的附加保护;对在低频区会误动的,应将其闭锁。当机组采用发电电动机-变压器组接线时,由于在起动过程低频区内机端电压过高时,变压器即会流过很大的励磁电流,故需装设变压器过励磁保护。③当采用主变压器低压侧△连接绕组的对称中心抽头作电动机半电压起动时,半电压和全电压间相位差60°,故半电压起动时要对变压器差动保护的电流相位作相应的处理,以保持电流相位一致。

电动机运行工况的继电保护 该工况要装设的保护:①要设电动机断电保护。当电动机电源消失时,机组在上库水头压力作用下,转速会迅速下降,经零点后往反方向旋转,甚至会达到飞逸转速,同时机组会发生较剧烈的水力振动,危及机组的安全。为此,一般装设低功率和低频率双重保护。②装设防御电动机异步运行的失步保护。③当需要时,装设防御电力系统电压过低而不能维持电动机正常运行的低电压保护。

主回路相序变换的继电保护 此时要考虑:①换相开关的保护是最主要的问题。当换相开关在变压器或电机的差动保护范围内时,则在发电和抽水两种不同工况下,要保证差动继电器两侧的电流互感器二次侧电流相位相对应。为此,最简单的方法是采用换相开关辅助触点切换电流互感器二次侧回路,但辅助触点工作一定要可靠;也可采用发电和抽水两种工况分设

差动保护的方法,但要多设一套差动保护;在换相开关的换相支路上装设电流互感器,将对应相的电流互感器二次侧并联后接到差动继电器上,这种方式也比较简单,但换相开关的换相支路要具备装设电流互感器的条件。当换相开关不在差动保护范围内时,则应为换相开关装设如阻抗继电器等的主保护。②有些保护(如阻抗保护、励磁消失保护、负序电流保护等)当接于换相开关的电机侧、且保护装置对输入的相序有固定要求时,则在发电和抽水两种工况下,相应的电流和电压相序要进行切换,也可对两种工况分别设置各自的保护。③为了保证机组主回路相序与运行工况相对应,还需设置电压相序检查继电器,作为起动过程的相序校核。

当抽水蓄能机组采用由水泵、水轮机和发电电动机组成的三机式机组时,抽水工况靠水轮机起动。发电电动机的发电和抽水工况都是同一旋转方向,因而没有起动过程的继电保护问题和相序变换问题。这种发电电动机的继电保护与常规水轮发电机的差不多,但要装设电动机运行工况的特殊保护。

(梁见诚)

choushui xuneng jizhu qidong fangshi

抽水蓄能机组起动方式 (motor starting method for pumped storage unit) 将抽水蓄能机组起动至水泵工况运行的方法。近代抽水蓄能机组以可逆式为主,这种机组抽水和发电都是用同一电机和转轮,仅是旋转方向不同。机组作发电工况运行时,其起动过程与水轮发电机组一样;作抽水工况运行时,机组从静止状态起动到水泵工况需要外加起动力矩,过去有采用同轴小水轮机的水力起动方式,但由于管道布置复杂、投资高而被淘汰,现在都采用电气起动方法。为了改善起动过程、降低起动设备的容量或减轻机组及电力系统的冲击,机组起动前一般都作如下处置:①高压油顶转子,即往推力轴承注入高压油,使转子略为顶起;当机组采用磁性推力轴承时,则往专设的磁浮力线圈通电,使转子略为提起;这样可使机组刚起动时的静摩擦转矩减少到接近零,这种措施也是大型机组在起动过程保护推力轴承所必需。②转轮室压入空气,使转轮完全脱离水面,这样在额定转速时,机组起动负荷转矩一般可降至额定转矩的1%~5%,而当转轮室有水时,平均可达30%额定转矩。常用的起动方法有异步起动、背靠背同步起动、半同步起动、同轴小电机起动和静止变频器起动等。

异步起动 在转子绕组经电阻短接的情况下,利用转子磁极的阻尼绕组产生的异步力矩,使机组按感应电动机的原理起动并加速,待机组转速接近同步转

速时加励磁,机组由同步力矩拉入同步。异步起动又分全压起动和降压起动两种方式。

(1)全压起动。利用机组的主断路器将待起动机组直接接入电网,在全电压作用下将机组起动。这种方式具有接线简单、起动力矩大、起动时间短和设备投资省等优点,但起动时冲击电流大,电力系统会产生较大的瞬时压降;电机要解决承受起动冲击电动力和阻尼绕组发热问题,大型机组往往采用整体磁极或采用水内冷式阻尼绕组。

(2)降压起动。采取降低电压的方法将机组起动。这种方式冲击电流较小,阻尼绕组发热较轻,但相应地增加接线的复杂性,延长起动时间,增加了设备投资。降压起动方式较常用的有:①电机回路串接电抗器降压起动。电抗器可串接在电机出线侧或中性点侧。起动时电机串接电抗器投入电网,机组便起动升速,接近额定转速时投励磁,机组被拉入同步,将电抗器短接后,便完成起动过程。②利用主变压器 Δ 连接的低压侧对称中心抽头的半压起动。这种方式无需外加的降压设备。机组用半电压起动后,待转速接近额定值时,切半压断路器,投全压断路器,经延时,投励磁;也可以在半压升速到临近额定转速时投励磁,使机组进入同步运行,然后切半压断路器,延时投全压断路器。这种方式对电力系统冲击小,但半电压与全电压间相位差 60° ,要注意合全压断路器时使机组与系统电压相位基本一致。此外,还有利用定子并联支路中的部分支路进行降压起动的。

背靠背同步起动 利用电站内或附近电站的一台可作发电机运行、而容量足够的机组将待起动为水泵工况的发电电动机组同步地拖动起来。起动前两台机组在电气上互相连接,两台机分别利用外加的励磁电源或励磁装置加上合适的励磁电流,然后发电机缓慢起动,并将电动机带动起来,两机同步升速,在转速约为80%额定转速时,励磁回路切换至机组自身的励磁装置上,发电机组的调速器投入工作,按自动准同期方式调节发电机的频率和电压,在满足同步条件时将电动机投入电力系统;其后,作拖动用的发电机解列、停机。这种起动方式对电力系统或电机都不会有什么冲击。

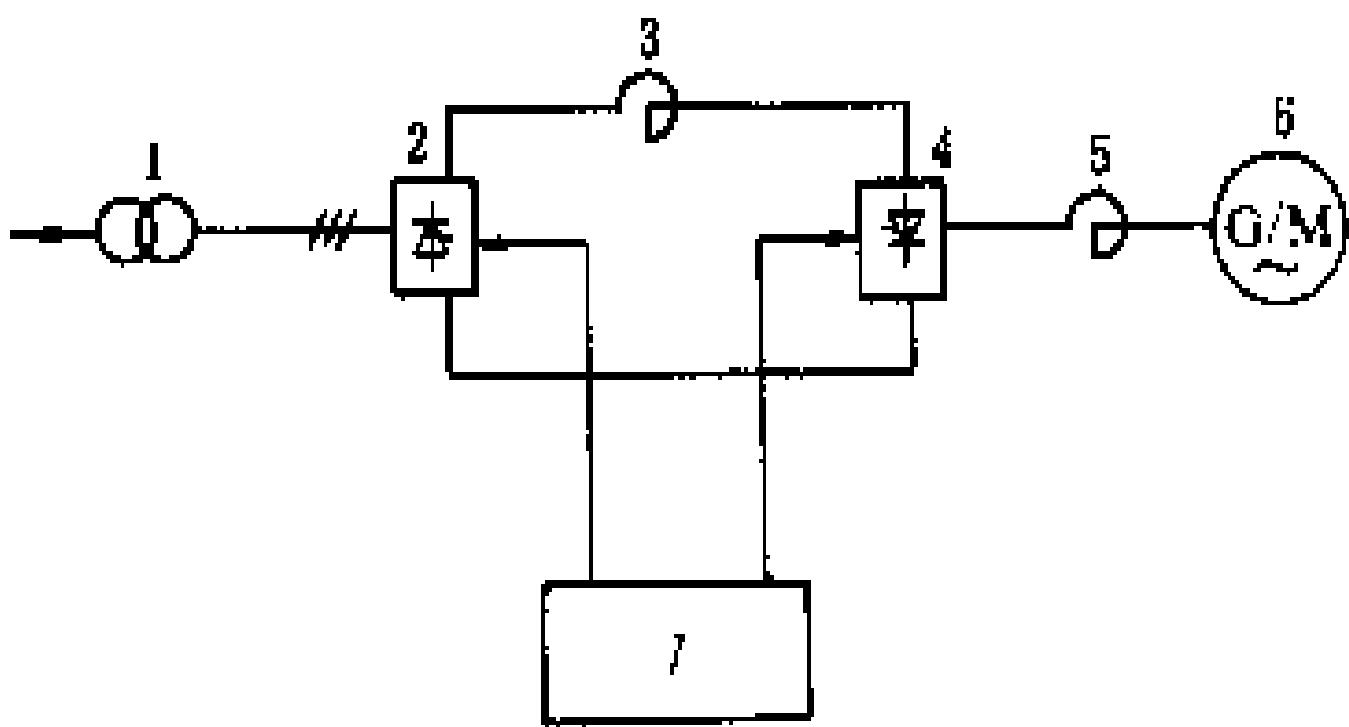
半同步起动 异步起动和同步起动的混合方式。作拖动用的发电机与待起动的发电电动机组可以事先在电气上互相连接,不加励磁,发电机先起动,待转速升至50%~80%额定值时加励磁。也可以在发电机升速、加励磁后才将未励磁的电动机接入。此时电动机在异步力矩作用下起动并升速,发电机则因带负荷而减速,当两机转速相接近时,电动机加励磁,然后由发电机带着电动机同步加速到额定转速,在满足同步的条

件下，将电动机并入电网。其后，发电机解列并减速到50%~80%额定转速，又可着手起动另一台发电电动机组。这种方式对电力系统没有什么冲击，且由于两次起动之间发电机不需停机而缩短了电站各机组总的起动时间，机组也不需外加的励磁电源；但机组要经受起动冲击，待起动的发电电动机的阻尼绕组要发热。

同轴小电机起动 在可逆式发电电动机组轴上直接连接一台滑环式线绕转子感应电动机，转子绕组与液体变阻器相连。机组起动时，投感应电动机的电源开关，使感应电动机在液体变阻器控制下，基本上按恒定力矩将机组起动加速，当转速接近额定值时，投励磁，在满足同步条件的情况下将机组投入电网；为了同步调速的需要，感应电动机的磁极要比主机少1~2对，使其最大转速大于主机的同步转速。这种起动方式，各机组自成单元，互相间没有牵连，对电力系统冲击不大。机组由于增设了起动电机而增加了高度，有可能使主厂房加高。对高转速机组，还可能影响转动部分的稳定性。

静止变频器起动 利用晶闸管变频装置输出频率

逐渐上升的交流电源将待起动的发电电动机组驱动起来。其原理示意如图，从电力系统来的工频交流电源经整流器变成直流，然后逆变器在控制装置控制下把直流变成频率从零至额定工频的交流电，从而将事先加了励磁的电机起动并加速到额定转速，然后将机组并入电力系统。这种方式对机组结构没有特殊要求，起动过程对机组和电力系统没有冲击，工作比较可靠，为近年新建的大型抽水蓄能电站广泛采用。



静止变频器起动原理示意图

1—输入变压器；2 整流器；3—平流电抗器；4 逆变器；5 输出电抗器；6—发电电动机；7 控制装置

可逆式机组电气起动方式综合比较见表。

可逆式机组电气起动方式综合比较表

起动方式		异步起动	背靠背起动	半异步起动	同轴小电机起动	变频器起动
适用范围	单机容量	中、小	大、中	大、中	大	大
	机组台数	不限	多	多	少	多
起动设备容量 (相对主机容量%)		60~120	15~20	约>80	6~8	6~8
起动时间 (min)		1~3	2~4	2~4	5~10	5~10
对电力系统的影响		大	无	无	小	小
需增加的起动设备		降压起动时需 降压设备	起动发电机、 单独励磁装置 或电源、起动母 线和断路器	起动发电机、 起动母线和断 路器	起动小电机、液 体变阻器、起动用 配电装置	变频装置、单独 励磁装置或电源、 起动母线和断路 器
投资 (相对单台同步电机投资%)		1~3 (全压) 7~19 (半压)	取决于具体情况		11~23	23~38
占 用 空 间		小			中	大
控 制 特 征		简单	复杂	复杂	较复杂	复杂
应用实例 (抽水蓄能电站)		(卢森堡) 圣安登 (Vianden)	(法) 大摩 (Grand Maison)	(美) 卡特斯 (Carters)	(南非) 德拉肯斯堡 (Drakensbeg)	(美) 巴斯康蒂 (Bath County)

(梁见诚)

船闸 (ship-lock) 借助闸室内水位升降，使船舶安全通过坝的上、下游的水工建筑物。船闸通常由闸室、上下游闸首及闸门、输水系统、上下游引航道、

导航建筑物、靠船建筑物等组成。船只下行时，先将闸室充水，待船室水位与上游相平时，开启上游闸门，船只从上游进入闸室，随即关闭上游闸门，闸室放水，待闸室水位降至与下游水位相平时，开启下游闸门，船只

出闸。上行时则程序相反。

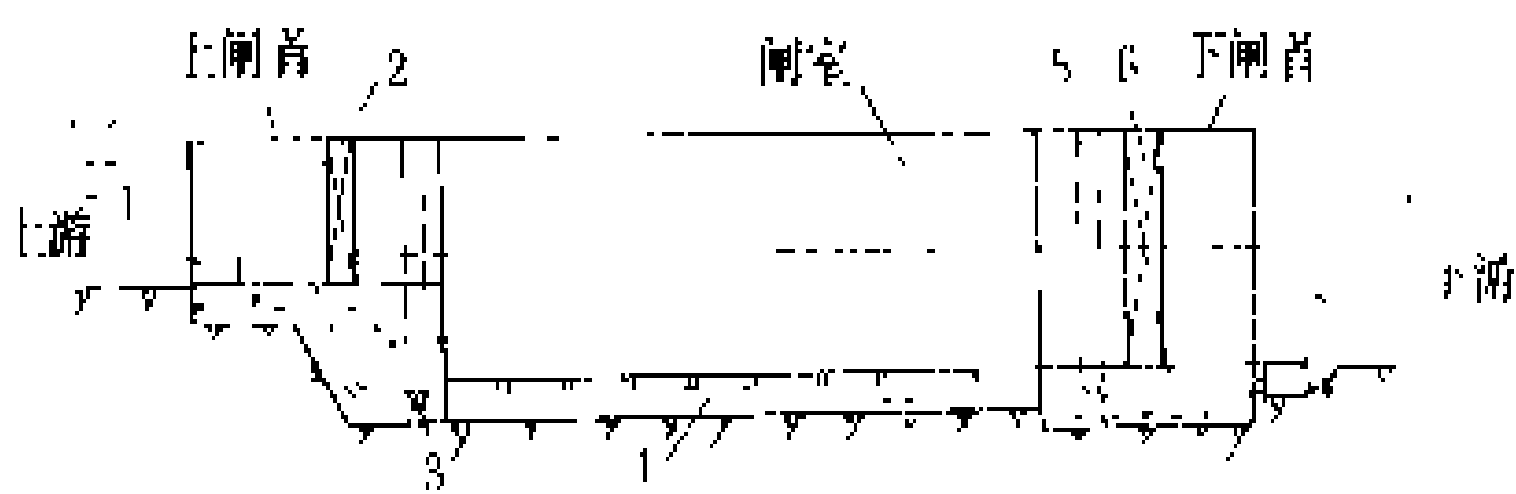
分类 按闸室的级数分,有单级船闸和多级船闸。单级船闸是将全部水头(上下游水位差)作为一级,船舶经一次升降即可通过的船闸,它只有一个闸室。多级船闸则将全部水头分为多级,逐级升降过船,有多个闸室。多级船闸有闸室相接的连续式和闸室之间有中间渠道的分离式两种类型。按设计最大过闸船舶吨级,船闸分为不同的级别。中国将船闸分为7级(见表)。

船闸分级指标表

船闸级别	I	II	III	IV	V	VI	VII
设计最大船舶吨级(t)	3000	2000	1000	500	300	100	50

规划设计 总水头20 m以下通常采用单级船闸;水头20~40 m可采用单级或两级船闸;当总水头大于40 m时,需采用两级或多级。船闸的尺度和线路数,主要根据设计船型、船队组合,以满足设计水平年内客、货运量及过船(木、竹)量的需要确定。当单线船闸的通过能力在设计水平年内不能满足运量需要时,往往要修建两线或多线船闸。船闸的最高和最低通航水位,应根据航运要求、航道和水电枢纽的条件等因素,在保证航运通畅和有利于发展的前提下,综合研究确定。

船闸的主体水工建筑物为上、下游闸首和闸室,其纵剖面见图。船闸的闸首和闸室,常采用混凝土结构的,平原地区的小型船闸的闸室也有采用护坡型式的。船闸的闸门,常采用钢质人字门,也有采用平板门、横拉门、三角门和一字门的。船闸的输水系统,有集中输水系统和分散输水系统两类。前者多利用通过闸首的廊道或利用闸首工作闸的顶部或底部集中输水,可适用于水位差小、输水流量小的中小型船闸。后者则常利用长廊道,通过分散于闸室两侧或底部的孔口输水,这种输水系统,船舶受水的激荡小,常用于水位差大、输水流量大的船闸。输水道上有控制输水的阀门,通常采用钢质平板门或反向弧形门。



船闸纵剖面示意图

1 输水系统进口; 2 上闸门; 3—上游阀门; 4 输水廊道; 5—下游阀门井; 6—下闸门; 7 输水系统出口

简史 世界上最早的船闸雏形是中国于公元123~424年在今江苏省扬州市附近的河段上建造的两座斗门(有闸门的建筑物),顺序启闭两座斗门,船只就

能通过集中水位差上行或下行。宋朝乔维岳于公元984~987年在今江苏省淮安至淮阴间的运河上利用双斗门修建了世界上最早的船闸。1949年中华人民共和国建立后在国内水利水电枢纽和运河上修建了约700座船闸,其中规模最大的是湖北省长江葛洲坝水利枢纽的一、二号船闸,其闸室尺寸为280 m长,34 m宽,门槛水深5 m(一号船闸为6 m),水位差27 m,可通过万吨级的船队。正在建设中的福建省闽江水口水电站枢纽的船闸,采用一线三级连续式,每级闸室尺寸均为135 m长,12 m宽,门槛水深3 m,总水位差57.36 m,可通过2只500 t级的船队;湖南省沅江五强溪水电站枢纽的船闸,采用一线三级连续式,每级闸室尺寸均为130 m长,12 m宽,门槛水深3 m,总水位差60.9 m,可通过2只500 t级的船队。正在设计中的长江三峡水利枢纽的船闸,采用二线五级连续式,每级闸室尺寸均为280 m长,34 m宽,门槛水深5 m,总水位差113 m,可通过万吨级的船队。欧洲从1481年开始在意大利建造船闸。20世纪以来,欧美等国多在较低水头的水电枢纽中修建船闸,其数量及规模也日益增加和扩大。世界上水位差最大的单级船闸是苏联乌斯特-卡明哥尔斯克(Усть-Камышурск)船闸,水位差42 m。

(李浩钧)

cuixing cailian shuigong jiegou maxing shiyan

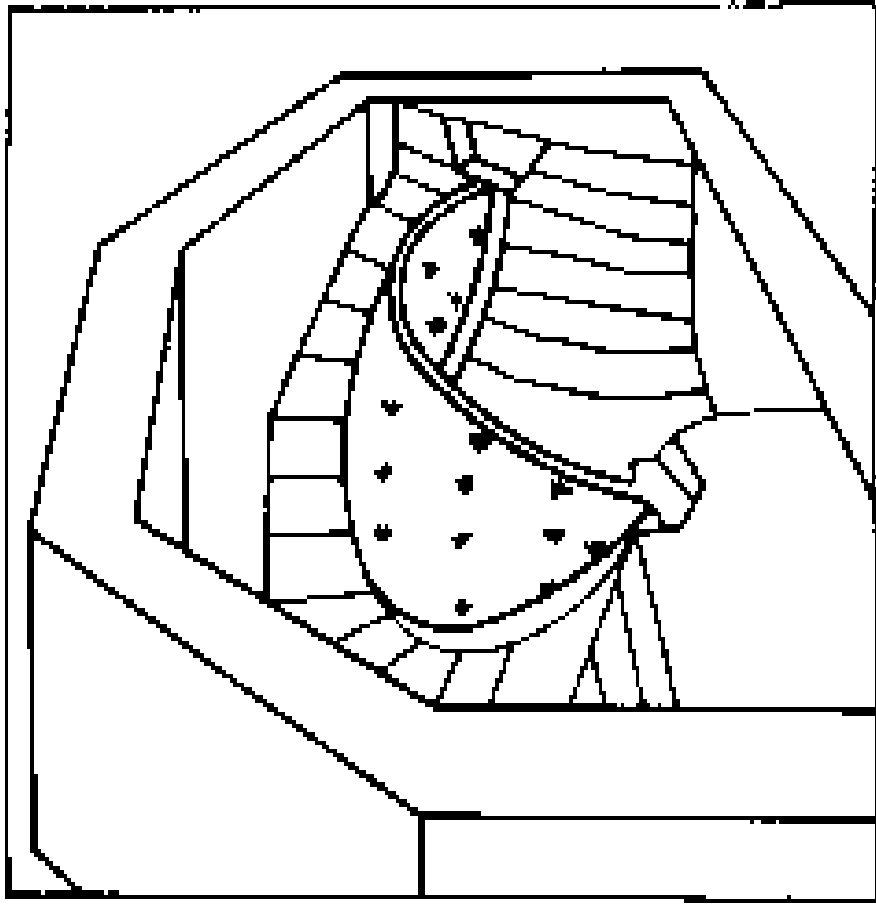
脆性材料水工结构模型试验 (hydraulic structural model test for brittle materials)

用与原型材料相似的脆性材料制成结构模型,研究其应力、变形和安全度的实验技术。在水利水电建设中常用的混凝土、石料及各类围岩多属脆性材料,通常用石膏类、石膏硅藻土混合材料类或混凝土(包括水泥浮石混凝土和微粒混凝土等)类脆性材料,按照相似理论制作模型,用电阻应变计及其他电测传感器或光测、机测方法,量测其受载荷后的应力、应变及位移等物理量,以研究结构物及其地基的应力、变形、稳定性及破坏等性态。它可以用于静力和动力问题的研究,也可进行破坏试验。它特别适用于拱坝、重力坝等大型水工建筑物的试验研究,也可用于渡槽、蜗壳、地下洞室、升船机塔柱等结构物的试验研究。

脆性材料结构模型试验根据其力学特性,可以分为两大类。一是研究结构在线弹性阶段的应力状态;另一种是研究结构及其地基由弹性阶段进入塑性阶段以至破坏的全过程,称为破坏试验。(见水工结构静力模型试验、水工结构破坏模型试验)

试验中可以考虑的载荷主要有坝体自重、静水压力、泥沙压力、扬压力、温度应力等。但扬压力的模拟

还有一些问题,温度应力试验比较繁复。施加载荷也有多种方法,如就静水压力而言,可用千斤顶加荷系统以及不同比重液体(包括水、水银等)的液压、气压等各种方式施加载荷。



浇筑完毕的拱坝整体模型示意图

备测试其应变及位移;④根据应力应变关系计算各点

试验程序是:
①选择适当模型材料,按一定相似准则设计和制作模型;②在模型上布置测点,粘贴电阻应变片或其他测试应力和位移的仪表;③施加预定的载荷后,用电阻应变仪或其他接收设备

的应力值,包括正应力、剪应力、主应力及其方向等,从而分析结构物的应力状态,评价其安全性和经济性。

脆性材料水工结构模型试验在国际上有两大学派。即以意大利的模型与结构试验所(Istituto Sperimentale Modelli e Strutture, ISMES)为代表的大模型学派(用大比尺模型)以及以葡萄牙的国家土木工程研究所(Labolatoria Nacional de Engenharia Civil, LNEC)为代表的小模型学派(用小比尺模型)。中国、日本、苏联等国有关单位则多采用介于两者之间的中等比尺的模型。

图为浇筑完毕的拱坝整体模型示意图。

参考书目

陈兴华等,脆性材料结构模型试验,北京:水利电力出版社,1984

(胡积龄)



报,做好洪水预报,科学地进行防洪调度并控制好泄水建筑物的运用。

(2) 大坝监测与检查。为掌握大坝实际运行性态,及时发现问题,对坝要进行有计划的监测及检查。坝的检查一般可分为日常巡查、年度详查、定期检查和特种检查等几种形式。日常巡查是有经验的专业人员在现场对大坝所作的经常性巡视检查。年度详查是运行单位在每年汛前、汛后或一定时期对坝的现场情况所作的详细检查及对观测资料、日常检查记录及运行维护资料的审阅、分析。定期检查或安全鉴定是长周期的对大坝性态所作的系统分析和审查评定,通常由运行、设计、施工、科研等有关单位的人员共同进行。特种检查是出现特殊自然条件(如大洪水、强烈地震)后或大坝发生重大异常时所作的检查。

(3) 大坝维修加固。见大坝维修。

(4) 险情预计及处理。对存在严重缺陷的坝,要对溃坝洪水所可能造成的淹没范围、洪水波推进时程等作出预计并提出处理措施。一旦出现险情征兆,立即按计划进行抢险并在险情解除后进行坝的修复工作。

大坝安全监测 狭义的大坝安全监测指使用观测仪器对大坝整体、地基及周围环境所作的定点、定期观察及测量。广义地说,也包括肉眼的非定点的检查在内。观测工作有多个环节,包括观测方法的研究确定,仪器设备的研制或购置,观测设计文件的编制,观测仪器的率定校验、埋设安装、现场施测,观测资料整理分析等。大坝监测工作应能可靠而准确地反映坝的实际性态,及时发现异常迹象,为坝的安全评价提供充分依据。

大中型坝的主要观测项目有:①环境因素及载荷情况观测(上下游水位、岸坡地下水位、气温、坝前水温、坝前淤积、坝区地震活动等)。②渗流观测(坝基扬压力、坝体浸润线或渗压力、坝体及坝基渗漏量、水质化验分析等)。③变形观测(水平及垂直位移、挠曲、倾斜、结构缝和裂缝表面变化、土坝固结、基岩变形等)。④结构内部情况观测(混凝土温度、应力、应变、自生体积变化,结构缝和裂缝内部变化,钢筋应力,接触面土压力,土体内应力、应变、孔隙压力等)。此外,有的坝还有过水建筑物水流观测、库坝区地形变化观测、危岩及滑坡观测、坝体地震反应观测等。

大坝观测资料分析 对观测数据须经过分析研究,才能反映出各种因素对测值的影响情况以及测值的时空变化规律,从而评价坝的实际性态,找出潜在问题,指导运行监控。分析观测资料一般从定性和定量两方面作研究。

(1) 观测资料定性分析。这是以坝工专业知识为指导,对观测数据及其过程线、分布图、相关图所作的较

daba anquan guanli yu jiance

大坝安全管理与监测 (management and monitoring of dam safety)

为使大坝具有足够的强度、稳定性、完整性、耐久性和充分的泄洪能力而进行的管理及对大坝、地基及其周围环境所做的观测检查工作。20 世纪 70 年代以来,坝的安全在世界各国越来越受到重视并相应地制订有法规、条例。其主要原因是:①随着已建坝的增多,坝失事的次数和波及面相应增大。②早期修建的坝已进入老龄期,出事的危险性在增加。③坝下游两岸人口日趋密集,经济不断发展,溃坝洪水所可能造成的灾害损失将比过去更加严重。④不少坝效益巨大,一旦失事对有关地区的生产、生活会带来严重影响。

大坝安全工作 大坝安全工作要贯穿建设前期工作、施工、运行全过程。

(1) 前期工作阶段。指保证大坝的规划、勘测和设计质量,特别是做好各项涉及大坝安全的项目,如设计洪水的确定,地质勘测及基础处理设计,地震烈度确定及抗震设计,滑坡、塌方预测及监视措施,坝址、坝型选定,大坝荷载、设计参数、设计方法和结构形式的选择,泄水建筑物和附属设施的设计,水库运用和调洪方案的拟定等。为了确保坝的安全,应设置切实有效的安全监测手段,有周密的大坝监测设计,并提出大坝首次蓄水的专门计划和监控要求。

(2) 施工阶段。保证大坝的建筑材料质量和施工质量,不留隐患,并做好观测仪器的埋设安装及施工期监测检查,保证施工期特别是首次蓄水期大坝的安全。

(3) 运行阶段。运用大坝时控制坝的工作条件,监视坝的性态变化,处理坝的缺陷隐患,使大坝处于安全运行状态。

大坝安全管理的内容 通常将大坝竣工验收投入运行后的各种涉及大坝安全的活动归入大坝安全管理的范围。主要内容有水库控制运用、大坝监测与检查、大坝维修加固和险情预计及处理等。

(1) 水库控制运用。为了安全调节洪水并合理发挥水库综合利用效益,应组织上下游雨情和水情的测



简易、直观的分析。主要从观测数据图表上看规律、特点和关系,从测值与历史值、设计值等的对比上作出是否正常的判断。

(2)观测资料定量分析。这是在定性分析基础上进一步用数学模型方法建立测值与各有关因素关系的数学方程,从而定量表达测值变化规律,对坝的某方面性态作抽象和简化的概括。常用的大坝性态数学模型有统计模型、确定性模型、混合模型等。

(谷云青 李珍照)

daba weixiu

大坝维修 (maintenance and repair of dam)

对运行中的大坝进行日常养护、缺陷处理、加固改建,以保证其正常和安全运行,发挥应有效益的工程措施。大坝可分为土石坝、混凝土坝和砌石坝3大类。土石坝的主要缺陷和事故有溃决、滑坡、裂缝、渗漏、管涌和流土、坍塌和穿孔、护坡破坏等。混凝土坝的主要缺陷和事故有滑动、裂缝、渗漏、高扬压力、混凝土和灌浆帷幕的老化等。砌石坝的主要缺陷和事故有裂缝、渗漏、滑坍等。在工程管理中,应加强肉眼巡检和仪器监测,及时发现问题,分析原因,提出针对性的处理措施,及时进行维修,以保证大坝正常和安全运行。

土石坝的维修 除保证不得漫顶外,主要是针对滑坡、裂缝、渗漏的3项维修工作。

滑坡 主要原因是可能滑动面上的滑动力超过抗滑力而导致失稳。对运行期的土石坝诱发滑坡的主要原因是孔隙压力升高而使土体抗剪强度降低,以及地震等附加荷载。处理措施有抢险、减少滑动力、降低孔隙压力、防止沙土液化、设抗滑键槽等。

(1)抢险。有滑坡预兆或已发生滑坡时要及时采取抢险措施,防止事故进一步扩大。如适当采取坡顶减载措施,在滑动坡脚处用砂石料压重,对上游库水位降落时的滑坡停止或放缓水位降落速度,对高水位时发生的下游滑坡降低上游水位、在下游面采取导渗措施降低浸润线位置等,待滑坡稳定后再作彻底处理。

(2)减小滑动力。减载、压重和放缓边坡,都是减小滑动力、增加抗滑力的有效措施。压重及补坡材料应尽量采用透水材料。

(3)降低孔隙压力。加强防渗系统及下游排水设施可降低坝体浸润线,增加高水位时下游坡的稳定性。下游坝趾的排水沟、减压井以及垂直坝轴线方向的水平排水孔,都是降低坝体浸润线的有效措施。

(4)设抗滑键槽坝基软弱夹层控制坝体稳定时,可以在离坡脚一定距离处挖槽切断软上层,用砂石料回填做成抗滑键,并在其上加沙石料压重做成反压平台。

(5)防止沙土液化。①松砂加密,以振冲法、挤密

砂桩等较为有效。②采用排水减压措施,使振动孔隙水压力更快消散。③采用压重及围封措施,增加砂体约束应力,阻止液化砂体的流动。

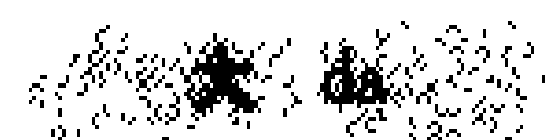
裂缝 按形态可分为纵缝、横缝、弧形缝、斜缝、水平缝和龟裂缝等类型。按成因可分为滑动、不均匀沉降、地震变形、水力劈裂、干缩等类型裂缝或多种因素的复合裂缝。其中以贯穿上下游方向的横缝、有滑坡先兆可能的弧形缝及水力劈裂形成的水平缝对大坝安全影响最大。对尚未稳定的活动性裂缝可能要反复处理或待变形稳定后再作处理。处理方法有开挖回填、灌浆、修混凝土防渗墙等。

(1)开挖回填。对表浅裂缝可用开挖沟槽后用粘性土料回填的方法处理,如系横缝,还需设置垂直裂缝方向的结合槽。回填土料宜与原防渗体土料相近,在最优含水量附近用人工或机械压实,干容重宜比原坝体土略高。

(2)灌浆。按机理可分为充填灌浆和劈裂灌浆。灌浆材料多为纯粘土浆或掺入少量水泥。①充填灌浆适用于裂缝走向明确,深度有限而有一定宽度的情况,一般都用自流或低压灌注,填满后因缝壁土料的吸水作用而使泥浆固结。②劈裂灌浆,利用水力劈裂原理,在一定灌浆压力下使坝体内沿垂直于小主应力的方向,即坝轴线方向,产生一条连续的竖向裂缝,在缝内及与该缝连接的所有内部裂缝或孔洞均由浆液充填密实。由于两壁土料的吸水作用,以及灌浆压力解除后坝体应力的回压作用,使浆液脱水固结,并保持一定的预压应力,而在坝轴线方向形成一道连续的防渗泥墙。同时由于浆液间多次互压和坝体土的浸水压密,也可以改善坝体质量。实施时只需在坝轴线上布置一排钻孔,用分序加密原则灌注,设备简单,可以处理坝内隐蔽裂缝,效果好,费用少,工期短,已在国内普遍推广应用,并已颁发相应的设计及施工规程。

(3)修混凝土防渗墙。对于裂缝、渗水、质量太差及内部反滤层不良的土石坝,或对于重要工程,可以在坝体内修建混凝土防渗墙进行加固处理。它还便于对坝基覆盖层一并处理。国内已有10余项工程采用,最深达68.5m。在施工中曾发生过坝体裂缝、漏浆、坍孔等事故,需加预防以保证施工顺利进行。墙身材料常用粘土混凝土,现在已掌握了塑性混凝土、固化灰浆、自凝灰浆等塑性材料,对土石坝防渗体而言,变形性能可更为适应。这项技术效果好,但需用机械设备多,造价较高。(见软基处理)

渗漏 渗漏对工程可能有3方面的影响:①渗漏量过大影响工程效益,甚至使水库不能蓄水。②渗水压力和比降过大,造成管涌和流土等渗透变形或破坏,影响工程安全。③抬高坝体浸润线,影响坝坡稳定。如果



渗水通过反滤排水设施有控制地排放,不会引起坝体或地基土的渗透破坏,而渗水量又不致影响工程效益,则属于正常渗流情况,不必进行处理。反之就是异常渗流情况,应根据坝地质情况、工程原有防渗排水系统及渗漏原因及工程要求,采取相应的防渗、排水或两者相结合的处理措施。

(1) 坝体防渗。采用开挖回填、灌浆、混凝土防渗墙等处理措施,与裂缝处理基本相同。对坝内反滤层质量不能满足要求、防渗体与基岩接触不良等情况,宜补做不冲刷材料组成的防渗体,如混凝土防渗墙等。

(2) 砂砾石坝基防渗。见软基处理。

(3) 导渗措施。主要有:①均质坝下游坡面有渗水出逸,使下游坡面浸润软化,或有局部滑坍,可做贴坡反滤排水层或导渗沟网,必要时再加透水料培厚坝坡。②在下游坝脚做反滤排水沟,解除下游剩余水头。③坝基为双层或多层结构,表面有弱透水层而在下卧透水层有承压水时,可用垂直减压井释放承压水头,避免表面弱透水层的流土破坏。④下游坝脚做透水盖重层,提高其抗渗比降及抗流土破坏能力。⑤在排水设施与坝体或地基土料接触处,必需加设单向或双向的反滤层。⑥与混凝土建筑物或基岩接触面有渗水时,可在下游面开挖一定长度后用反滤料包裹,防止接触冲刷。

(4) 喀斯特及岩基渗漏的处理。见岩基处理。

(5) 集中渗流的防治。在土石坝下游坡面及地基有成股水流或泉眼型渗水,表明有集中渗漏通道存在,严重时往往出现浑水、坍坑、内部冲刷等险情,必须及时降低上游水位,并采取抢险措施。最有效的措施是找到上游渗水入口,用砂石料或袋装土料堵塞,再抛填粘土料闭气。在下游渗水出口处,先铺反滤料,再填砂石料阻止土料继续流失。如遇流速太大,砂石料受冲刷的情况,可以修筑围井抬高下游水位,降低流速,然后在井中填反滤料及砂石料封堵,并将围井中渗水导出。在险情排除后,应查清原因,进行彻底处理。

土工合成材料的应用 土工合成材料是一种新型的建筑材料,包括起防渗作用的土工膜,起反滤排水作用的土工织物,起加筋、排水、护面等作用的专门土工合成材料等类型,在土石坝维修中有极大的应用前景。(见土工合成材料)

混凝土坝的维修 主要有裂缝、渗漏、滑动和混凝土老化等项处理。

裂缝 混凝土在体积收缩受到约束、不均匀变形、温度、外荷载等因素作用下,拉应力超过了抗拉强度就会产生裂缝。混凝土裂缝按其发展情况可以分为:①稳定裂缝,即由于外因消失或拉应力解除而不再发展。②张缩缝,即裂缝可因环境因素的变化(如冷热、干湿、外力的周期性变化等)而在一定范围内扩张和收缩。③发

展缝,由于外力作用而仍在发展之中,尚未趋于稳定状态。裂缝还可按其结构效应分为导致渗漏的缝、破坏结构或构件的整体性的缝和起伸缩缝作用的缝等。需查明其成因、形态及结构效应,分别采取维修措施。如稳定缝可以用刚性材料处理;张缩缝要用延伸率高的柔性材料处理,以适应其扩张和收缩,或在裂缝开度最大时作灌浆等处理;发展中的缝需在消除引起裂缝的外因或待裂缝稳定后再作处理,以免处理后又被拉开,必要时也可采取临时性的处理措施。对仅引起渗漏问题的裂缝可以用表面覆盖、镶嵌或灌注防渗性能好而强度不一定高的材料;对要求恢复结构整体性的情况就要灌注高强度材料及采取锚固等结构补强措施;要保留其伸缩性能时要灌注弹性材料等。同时也要注意已有裂缝处理后会不会在其他薄弱部位引起新的断裂。

(1) 表面覆盖。有喷涂、粘贴或锚压、镶嵌等方法。①喷涂,将表面凿毛,冲洗干净后,用水泥浆、水泥砂浆、沥青砂浆、环氧砂浆以及各种防水材料的浆液涂抹在混凝土表面,也可用喷射水泥砂浆、乳化沥青、高分子材料浆液的办法封堵裂缝部位,必要时还可用挂钢丝网或钢筋网再喷浆处理。②粘贴或锚压,将表面凿毛或凿宽线槽,清理干净后用胶粘剂将土工薄膜、橡胶布、紫铜片等防渗薄膜粘贴在裂缝部位的表面,起封闭作用。有的材料不能与混凝土粘结的,或大面积不便粘贴时,可以用压条加锚杆的办法将防渗薄膜锚压固定在混凝土表面。③镶嵌,在裂缝表面凿成“V”形或梯形槽,在槽内嵌入能与混凝土粘结而又有良好延伸性的柔性材料,如沥青油膏、聚氯乙烯胶泥、非硫化橡胶及其他高分子材料,表面再用水泥或环氧砂浆抹平保护。

(2) 灌浆。对有一定深度的裂缝以及内部裂缝,一般用灌浆处理。一般裂缝宽度大于 0.3 mm 的可用水泥灌浆,小于 0.3 mm 的要用化学灌浆,有些化学浆液可灌注 0.1 mm 甚至更细的缝。近年来发展的超细水泥灌浆也可以渗入过去只有化学灌浆才能处理的细缝。化学灌浆材料品种很多,可适用于各种情况。如防渗堵漏可用丙凝、丙烯酸盐、聚氨酯等;要适应裂缝张缩情况时可用弹性聚氨酯、水溶性聚氨酯等弹性材料;需要高强度以恢复结构整体性时可采用改性环氧树脂、甲凝、聚氨酯等高强材料。酸性水玻璃浆液稳定性较碱性水玻璃好,可以在永久性工程中试用。灌浆处理后的裂缝表面也常作覆盖处理。

(3) 结构补强措施。对影响结构整体性和承载能力的裂缝,或受力较大部位的裂缝,除灌浆处理外,还可采用锚筋、预应力锚索、骑缝钢板锚固在完整混凝土中、挂钢筋网喷混凝土等结构补强措施。但必需根据具体情况,个别进行补强设计。

渗漏 坝体渗漏的主要通道是裂缝及混凝土的质

量缺陷,其封堵方法主要是表面处理和灌浆,见前述混凝土坝裂缝处理。对大面积渗漏可在上游面补做沥青混凝土、钢筋混凝土、土工薄膜的防渗层。坝基及绕坝渗漏除有喀斯特等集中渗流通道的情况外,主要是引起扬压力升高而使抗滑安全度降低,甚至失稳。其原因大都是原有灌浆帷幕质量不好或者年久失效,下游排水系统不足或堵塞失效。可根据观测结果的分析,采取相应措施。灌浆帷幕降压效果不好或失效时,需进行补强,遇只析水不吃水泥浆的情况,可增设化学灌浆帷幕,如中国陈村、凤滩等水电站的大坝都曾采用两排水泥灌浆中央一排丙凝或聚氨酯灌浆处理,以降低过高的坝基扬压力。用水泥灌浆封堵大裂隙,再用化学灌浆堵塞细微裂隙,既可收到更好效果,也可节省昂贵的化学浆材,国内已有成功经验。下游排水设备对降低扬压力极为有效,如原有排水设备堵塞失效,则可设法疏通,也可增设排水孔、排水洞组成排水帷幕,以改善排水条件。遇泥化夹层等可冲刷材料时,应在排水孔内设反滤材料。

滑动 主要有沿混凝土与基岩接触面滑动和沿基岩内的软弱结构面滑动两类。滑动原因有超载、高扬压力、基岩内软弱夹层软化、下游抗力体被冲刷掉等,要按其原因而采取相应的处理措施。在出现潜在滑动危险时,要采取降低上游水位、排水降低扬压力等临时应急措施,然后再研究处理。处理方法主要是增加有效应力和增加潜在滑动面上的抗剪力,如加大坝的断面、加强帷幕和排水甚至抽排以降低扬压力、混凝土与基岩面的接触灌浆、预应力锚索、加固下游抗力体以提高其抗力、切断软弱结构面的钢筋混凝土键、大型抗滑桩等。(见岩基处理)

混凝土老化 混凝土受到冷热、冻融、干湿、溶蚀、碱骨料反应、炭化等作用,而在长期运行过程中丧失或降低其强度和抗冲抗渗能力。一般老化现象以表浅部位为主,常以表层处理作为补强措施,以恢复混凝土表层的完整、平整和提高其耐久性。①挖补。将表面风化剥蚀层及蜂窝麻面等凿除后用水泥砂浆或混凝土填补抹平。老混凝土表面

要保持湿润,并先抹一层水泥浆,以利结合。填补的砂浆和混凝土要采用尽可能小的水灰比,一般可用到0.3~0.35。必要时可采用环氧砂浆、环氧混凝土、硅粉混凝土等高强耐蚀材料。②喷砂浆或喷混凝土。可采用无筋的,也可挂钢筋网或钢丝网,适用于较大面积的修补。③压浆混凝土。预先将混凝土骨料填于需修补部位的模板内,通过预埋的灌浆管,将水泥砂浆在压力下注入骨料空隙,填塞密实而成高质量的混凝土,适用于不便浇捣的部位。④表面加设防渗层,如混凝土坝裂缝处理所述。⑤整体混凝土老化一般用灌浆方法处理。

(蒋国澄)

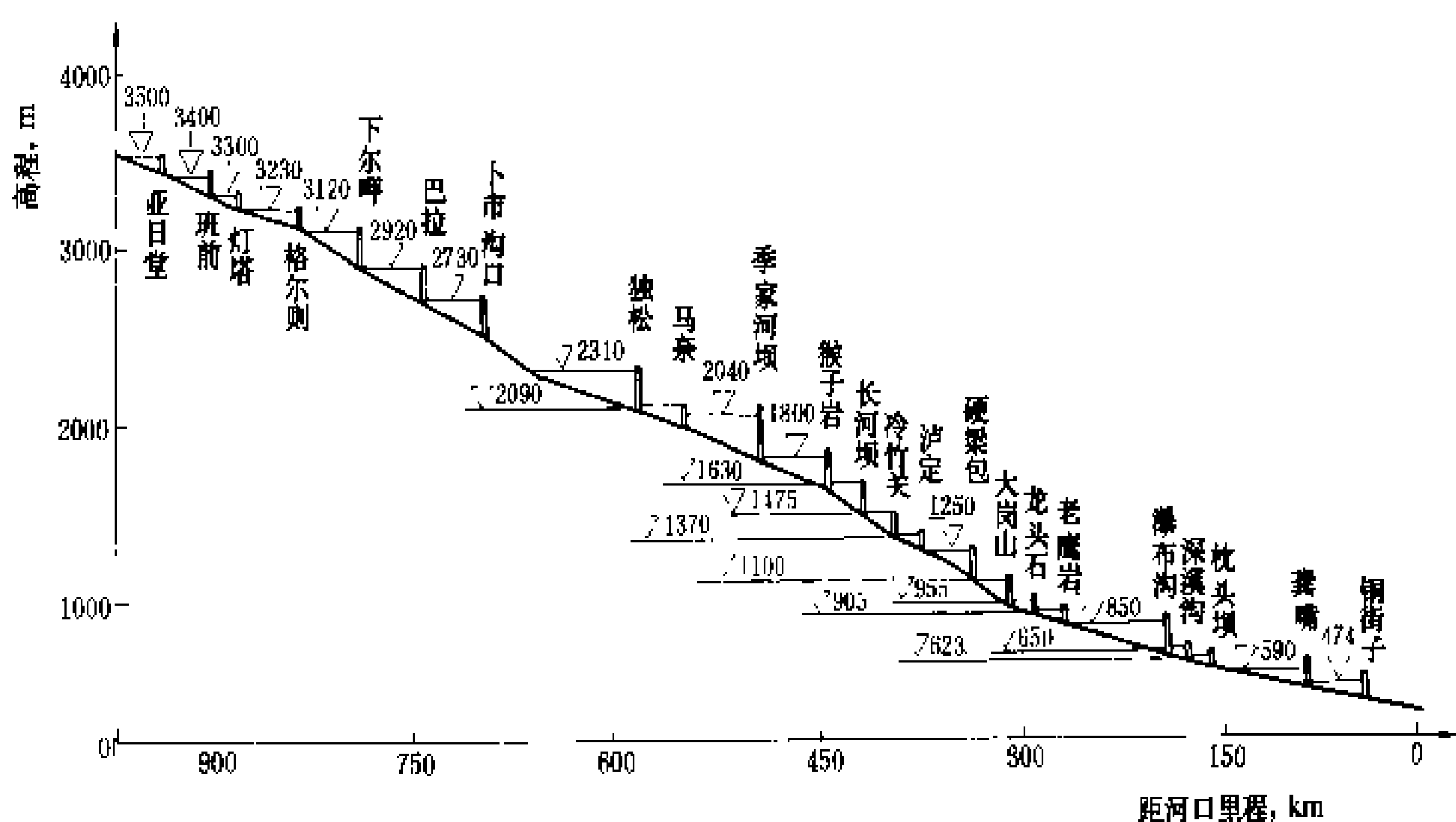
DaduHe shuidian guihua

大渡河水电规划 (hydropower development planning of Dadu river)

根据1980年《中华人民共和国水力资源普查成果》和成都勘测设计院1983年编制的《大渡河规划报告》,大渡河上布置有亚日堂、班前、灯塔、格尔则、下尔呷、巴拉、卜市沟口、独松、马奈、季家河坝、猴子岩、长河坝、冷竹关、泸定、硬梁包、大岗山、龙头石、老鹰岩、瀑布沟、深溪沟、枕头坝、龚嘴、铜街子共23级水电站(见图)。共利用水头2648 m,总库容199亿m³,调节库容99亿m³,装机容量19290 MW,平均年发电量1084亿kW·h。

大渡河发源于青海省果洛山东南麓,分东、西两源,东源是木足河与西源卓斯甲河于双江口汇合后称大金河,至丹巴始称大渡河,继而流经泸定、石棉、汉源等地于乐山市汇入岷江,河长1062 km,流域面积77400 km²,河口处多年平均流量1510 m³/s,干流拥有水能理论蕴藏量(见水能资源)1841亿kW·h/a。

开发大渡河水资源的主要任务是发电,兼顾漂木、



大渡河梯级水电站布置图

防洪和航运,大渡河梯级水电站的装机容量和年发电量均占四川省可能开发水能资源量的 21%。大岗山至铜街子河段的地理位置靠近负荷中心,水库调节性能较好,对外交通较方便。大岗山、龙头石、瀑布沟、龚嘴(加高)、铜街子 5 座水电站的指标较好,可先开发。瀑布沟和独松水电站是全梯级的骨干工程。

瀑布沟水电站位于成昆铁路乌斯河车站上游。坝区为花岗岩和流纹斑岩,河床覆盖层最大厚度为 63 m,地质构造破坏较弱,地震基本烈度为 7 度。坝壅水高 179 m,总库容 52.6 亿 m^3 ,可使其下游电站增加保证出力 560 MW,年发电量增加 12.3 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,规划在 2000 年前后开发。

独松水电站位于梯级水电站的较上游。其正常蓄水位为 2310 m,总库容 49.6 亿 m^3 ,调节库容 26.8 亿 m^3 ,利用水头 218 m,装机容量 1360 MW,平均年发电量 70.1 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

(陈励元)

Daguli Shuidianzhan

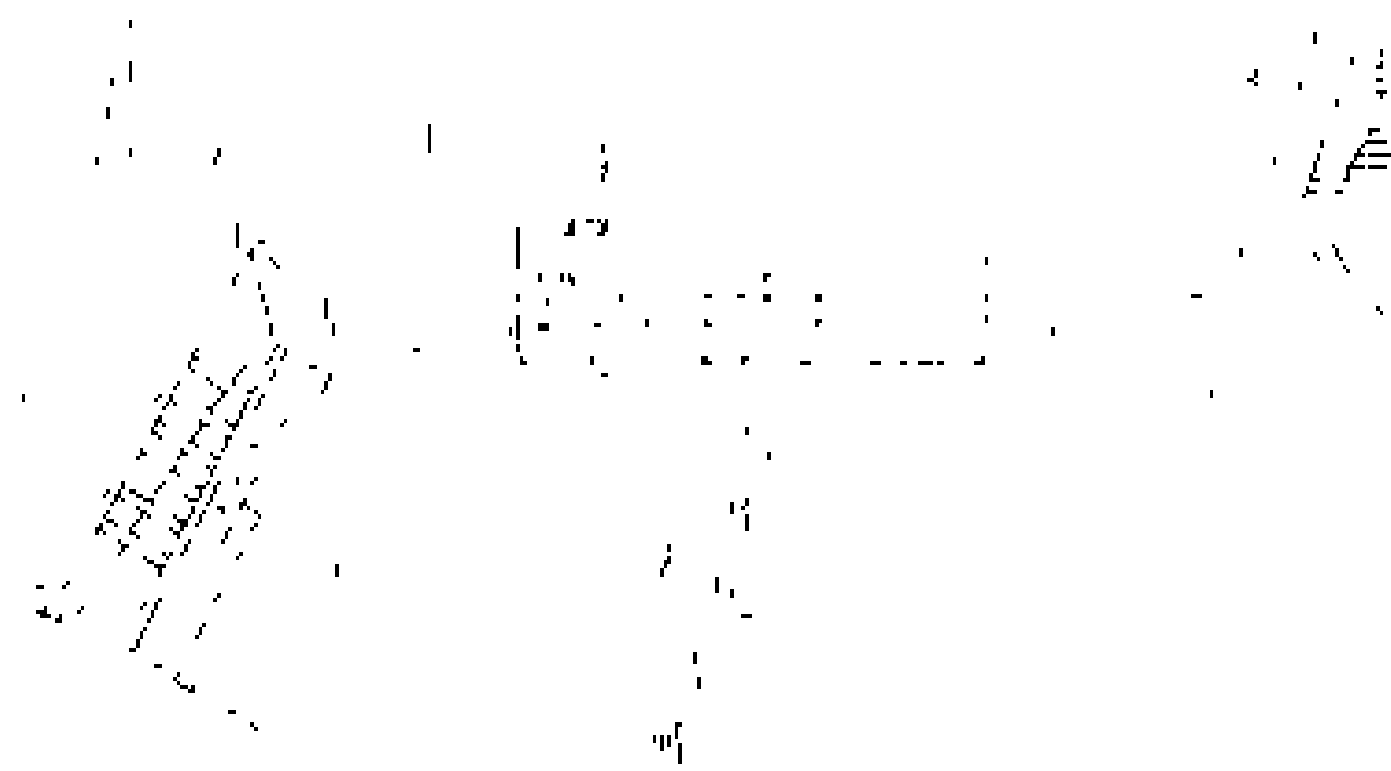
大古力水电站 (Grand Coulee Hydropower Station) 位于美国西北部哥伦比亚河干流上。初期建有第一和第二厂房,装机容量 1974 MW,年发电量 146 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。70 年代增建第三厂房,进行扩建,并对初期安装的机组扩容,加上安装 6 台抽水蓄能机组,使总装机容量达到 6494 MW,年发电量 248 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。计划进一步扩建,使最终规模达到 9104 MW。电站初期以 220 kV 高压输电线路接入邦纳维尔电力系统,扩建后改用 500 kV 超高压输电。电站除发电外,还有提水灌溉、防洪、调节径流、旅游等综合利用效益。主坝为混凝土重力坝,最大坝高 168 m。工程于 1933 年开工,1941 年开始发电,初期工程于 1951 年完成。1967 年开始扩建,1975 年第一台扩建机组发电,1979 年完成。(参见彩图插页第 15 页 24 图)

水文和水库特性 坝址以上流域面积 19.2 万 km^2 ,平均年径流量 963 亿 m^3 。正常蓄水位 393 m,相应库容 118 亿 m^3 。死水位 368 m,调节库容 64.5 亿 m^3 ,连同上游干支流水库调节系数 $\beta_r=0.47$,可进行多年调节。最大水头 108.2 m,设计水头 86.9 m。

枢纽布置 坝址基岩为花岗岩,混凝土重力坝连同扩建的前池坝总长 1592 m。河床中部为溢流坝,左右侧设第一和第二厂房,左岸为提水灌溉的抽水站,右岸为扩建的第三厂房。平面布置见图。

溢流坝顶设 11 个溢流孔,各孔宽 41 m,高 8.5 m,用鼓形闸门控制,泄洪能力为 28300 m^3/s 。溢流坝右侧 7 孔溢流孔宽度的坝体内,设有 60 个泄水孔,孔径 2.6 m,分 3 层布置,泄流能力 7790 m^3/s 。溢流坝下

采用消力库消能。



大古力水电站平面布置示意图

1—混凝土重力坝; 2—溢流坝; 3—泄水孔; 4—第一发电厂房; 5—第二发电厂房; 6—第三发电厂房; 7—扩建的前池; 8—抽水站

第一和第二厂房内各安装 9 台混流式水轮发电机组,单机容量 108 MW,70 年代更换发电机绕组,出力提高到 125 MW。第一厂房内还装有 3 台厂用机组,单机容量 10 MW。第三厂房内安装单机容量 600 MW 和 700 MW 的机组各 3 台,其单机最大出力分别为 730 MW 和 827 MW。第三厂房前池坝的下游端留有余地,以备进一步扩建。

抽水站内安装 12 台机组,前 6 台为电动水泵,后 6 台为抽水蓄能机组,共计电动机功率 590 MW,利用大古力水电站所发电力从大古力水库内抽水,抽水扬程 85~110 m,抽水能力 611.6 m^3/s ,提水灌溉哥伦比亚河左岸干旱高地 44.3 万 ha。利用岸上调节水库调蓄,抽水蓄能机组可提供调峰容量 314 MW。

工程扩建 大古力水电站的装机容量扩大到初期规模的 3.29 倍,主要原因为:

(1) 美国与加拿大订立了哥伦比亚河条约,加拿大在上游兴建了 3 座大水库,美国也在支流上建了几座大水库,使哥伦比亚河的径流得到充分调节,电站保证出力大大提高。

(2) 大古力水电站所在的以水电为主的邦纳维尔电力系统,用超高压交直流输电线路与火电为主的加利福尼亚电力系统相联,使大古力水电站从担负基荷变为担负峰荷。

工程量和投资 初期工程,开挖土方 1570 万 m^3 ,石方 160 万 m^3 ,混凝土量 809 万 m^3 。扩建工程,挖除 79 m 长的原坝体混凝土 23657 m^3 ,开挖土方 1379 万 m^3 ,石方 380 万 m^3 ,浇筑混凝土 109 万 m^3 。

初期工程按 1948 年估价,包括灌区建设,总投资 4.87 亿美元,其中发电分担 1.14 亿美元。1977 年计划将电站扩建至 6494 MW,灌区发展至 44.3 万 ha,总投资增加到 28 亿美元,其中发电分担 7.81 亿美元。

(陆钦侃)



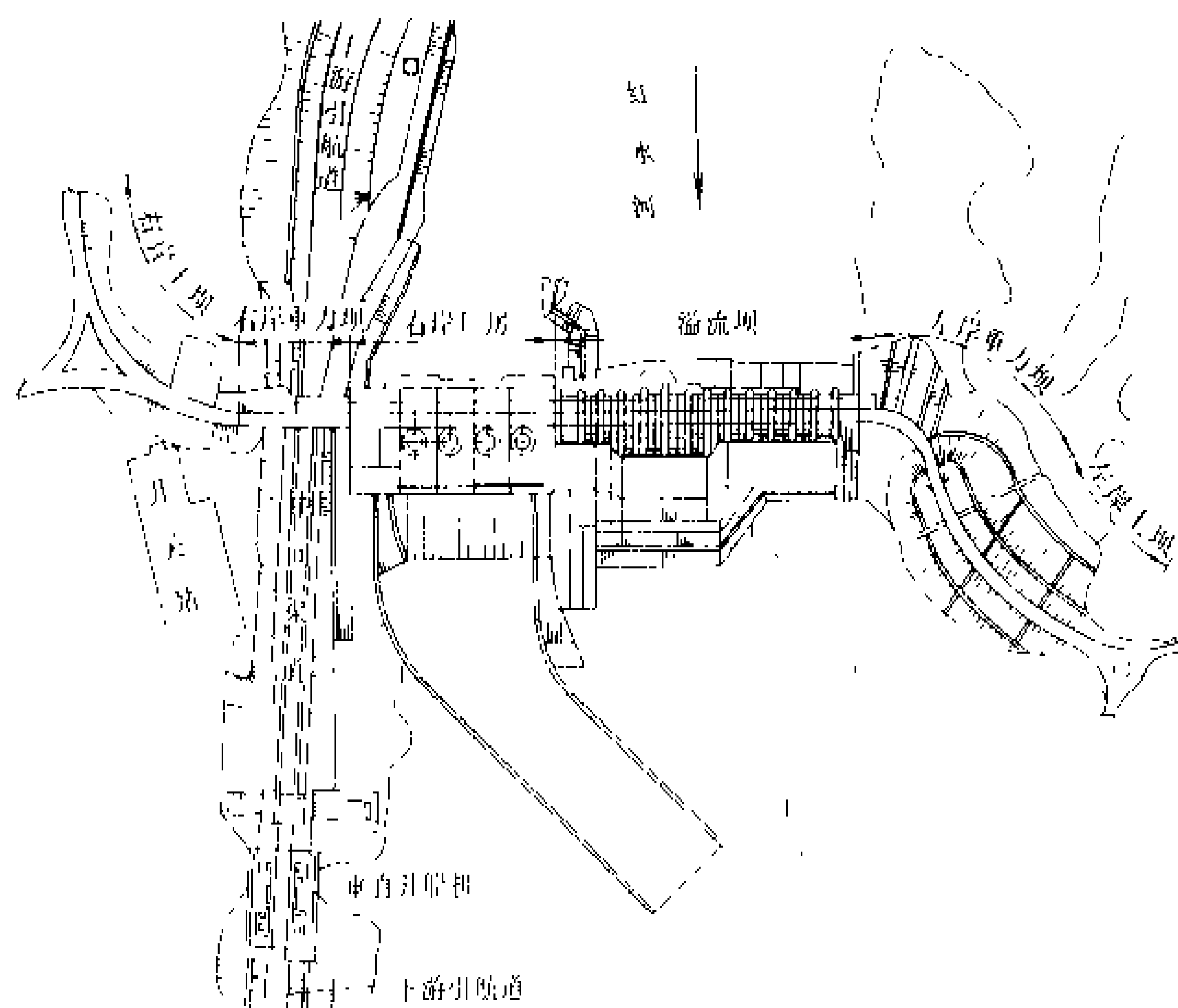
Dahua Shuidianzhan

大化水电站 (Dahua Hydropower Station)

位于红水河干流中游,广西壮族自治区都安瑶族自治县和马山县交界处。电站以发电为主,兼有航运等综合效益,近期装机容量 400 MW,保证出力 106.8 MW,多年平均年发电量 21.05 亿 kW·h。上游龙滩水库建成后,扩建左岸厂房,最终装机容量增加至 600 MW,多年平均年发电量可增加至 33.19 亿 kW·h。电站以 110 kV 和 220 kV 电压输电线各 3 回送电给南宁。主坝为混凝土重力坝和空腹重力坝,最大坝高 74.5 m。工程于 1975 年 10 月开工,1983 年 12 月第一台机组发电,1986 年底竣工。(参见彩图插页第 38 页 76 图)

水文和水库特性 坝址以上流域面积 11.22 万 km²,多年平均年径流量 628 亿 m³,多年平均流量 1990 m³/s。多年平均年输沙量 4740 万 t。水库正常蓄水位 155 m,死水位 153 m,总库容 9.64 亿 m³,为日调节水库。大坝按百年一遇洪水设计,相应洪水流量 23200 m³/s,上游库水位 163.8 m,下游尾水位 161.0 m;按千年一遇洪水校核,相应洪水流量 31000 m³/s,上游库水位 169.3 m,下游尾水位 166.2 m。电站最大水头 39.2 m,最小水头 13 m,设计水头 22 m。

枢纽布置 工程挡水前沿全长 1166 m。主要建筑物有河床式厂房、重力坝溢流坝段、重力坝挡水坝段、土坝、开关站和通航建筑物等,见图。



大化水电站枢纽平面布置图

坝址主要地层为三叠系下统灰色薄层状泥岩和薄

层灰岩互层,岩性软弱,结构挤压强烈,平缓断层发育,工程地质较为复杂。

坝顶高程 174.5 m。溢流坝布置在河床左岸深河槽部分,长 228.4 m,设有 13 孔开敞式溢流孔,孔口宽 14 m,高 14 m。

厂房布置在右岸滩地,为全封闭式结构,副厂房重叠布置在主厂房上,是中国当前承压水头最大的河床式厂房。厂房长 175 m,宽 75.6 m 高 83.28 m。厂内安装 4 台轴流转浆式水轮发电机组,单机容量 100 MW,额定转速 76.9 r/min。水轮机转轮直径 8.5 m。发电机为伞式空冷型,额定电压 15.75 kV,定子铁芯内径 12.8 m。厂房进口前沿设有 4 个排沙底孔,由左右两侧廊道分别向下游排沙。

通航建筑物布置在右岸台地上,由上游引航道、挡水坝段、中间通航渠道、升船机和下游引航道等组成。航道全长 1266.88 m。采用 250 t 卷扬升降平衡式垂直升船机,最大升程 36.6 m,设计双向年货运量 180 t。

设计和施工单位 广西壮族自治区电力工业局勘测设计院设计,广西壮族自治区大化水电工程指挥部施工。

(李维藩)

Dajiaxi Tiji Shuidianzhan

大甲溪梯级水电站 (Dajiaxi Cascade Hydropower Stations)

位于台湾省中西部,由德基、青山、谷关、天轮等 4 座水电站组成,见图。

大甲溪发源于中央山脉,向西注入南海,全长 124 km,平均坡降 1:40,流域面积 1272 km²,年雨量在 1500~2500 mm 之间,是全省水能资源最丰富的河流。上游河段地势开阔平坦;中游河段,河道在峡谷中穿行,有利于水电开发;下游河段,为大片肥沃平原,有台中市等工业城市,需灌溉和供水。从 1950 年四级天轮水电站开工起,至 1974 年一级德基水电站竣工止,历时 24 年,全部梯级水电站建成,总装机容量 874 MW。1975~1977 年,还在四级天轮水电站下游修建了专供工农业用水的

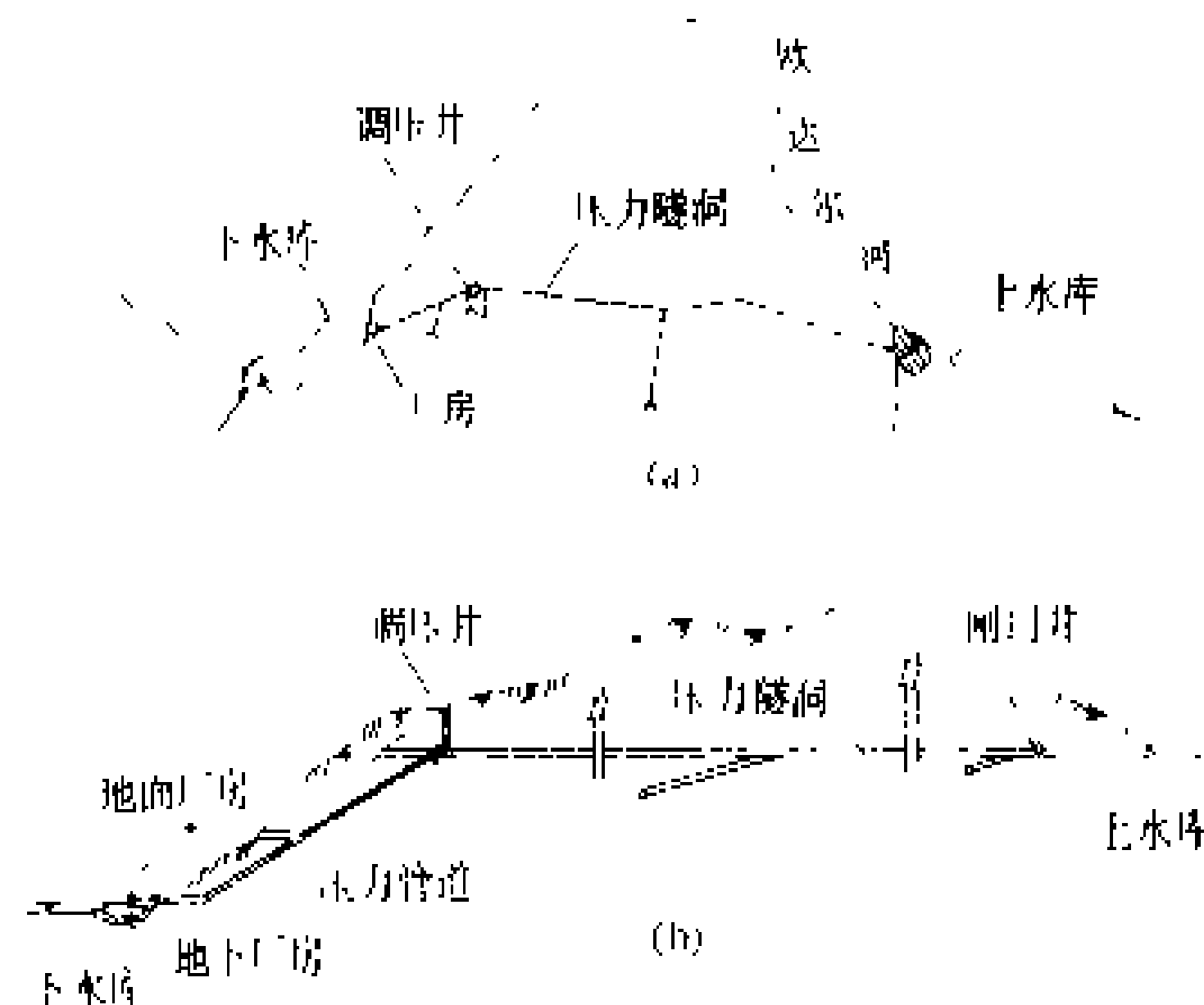
石岗水库。

坝,呈圆筒形,高 85.1 m,坝顶长 149 m,上游面半径 92 m,厚度从顶部 4 m 变化到底部 10 m。坝上部设有 4 个宽 6.6 m,高 9.3 m 的泄流孔口,用平面闸门控制,设计泄洪流量 5760 m³/s。水库总库容 1710 万 m³。工程于 1957 年 9 月开工,1961 年 12 月竣工。

四级天轮水电站 坝址以上流域面积 796.6 km², 水库总库容 82.4 万 m³。正常蓄水位 747.8 m, 调节库容 75.4 万 m³。装机容量 100 MW。大坝为混凝土重力坝, 最大坝高 54 m, 坝顶长 92 m。引水隧洞长 9000 m。工程于 1950 年开工, 1952 年竣工。

DawuChoushui Xu* ceng Dianzhan**

大屋抽水蓄能电站 (Grand Maison Pumped Storage Power Station) 混合式抽水蓄能电站, 位于法国东南部格里诺布尔市东面阿尔卑斯山区的欧达尔河上(参见彩图插页第16页27图)。装机容量1800 MW, 年发电量14亿 kW·h。年抽水耗电量为17亿 kW·h。以400 kV超高压输电线路接入法国东部电力系统, 对电力系统起调峰填谷和紧急事故备用的作用。电站于1980年开工兴建, 1986年开始发电, 1987年竣工。工程总布置见图。



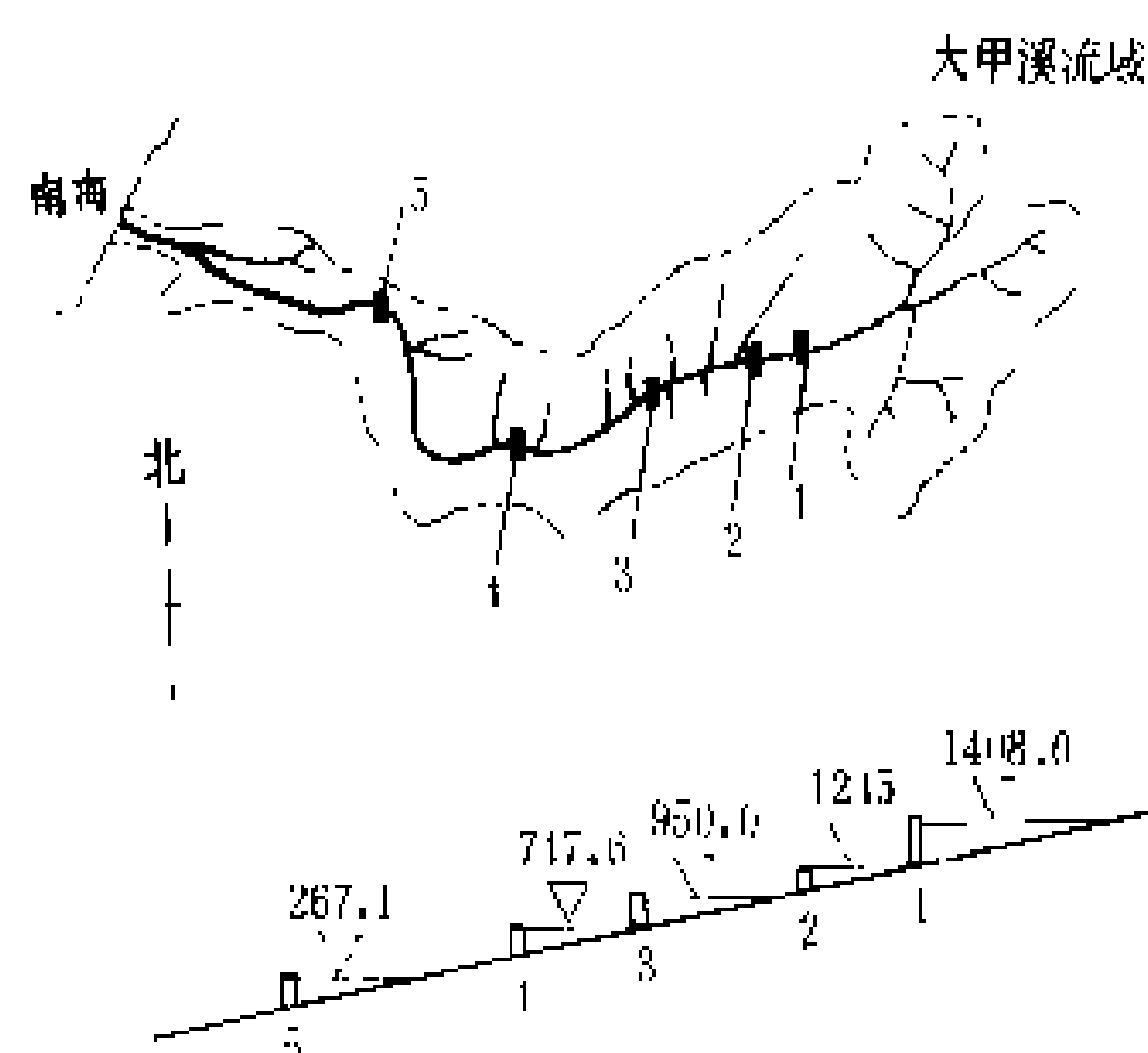
大屋抽水蓄能电站工程示意图

(a) 平面布置示意图; (b) 水路纵剖面图

上水库和下水库 上水库坝为心墙土石坝, 坝高 160 m。坝址以上集水面积 50 km², 年平均流量 3.3 m³/s。正常蓄水位 1695 m, 相应库容 1.4 亿 m³。最低水位 1590 m, 调节库容 1.32 亿 m³, 可进行季调节。

下水库坝为沥青混凝土面板堆石坝,坝高 42 m,坝下为深覆盖层,最大厚度达 80 m。采用深 50 m 的悬挂式混凝土防渗墙防渗。坝址以上集水面积 115 km²,多年平均流量 4.4 m³/s。正常蓄水位 768.5 m,相应库容 1560 万 m³。最低水位 740 m,调节库容 1430 万 m³。

引水系统 进水口布置在上水库大坝左岸,采用



大甲溪梯级水电站开发示意图

1—德基水电站;2—青山水电站;3—谷关水电站;4—大
干水电站;5—石岗水库

一级德基水电站 坝址距出海口 87 km, 控制流域面积 514 km²。上游河谷开阔, 居民稀少。坝址河谷狭窄, 山坡陡峻, 水面仅宽 20 m。坝址地质为石英砂岩和板岩, 岩石节理发育, 但无重大断层。

电站装机 234 MW, 以发电为主, 兼有防洪、灌溉和旅游等综合利用效益。设计洪水按可能最大降雨量确定为 $6400 \text{ m}^3/\text{s}$ 。水库正常蓄水位 1408 m, 相应库容 2.32 亿 m^3 。死水位 1350 m, 调节库容 1.75 亿 m^3 。

大坝为双曲薄拱坝,坝顶弧长 290 m,坝高 181 m,底部厚 20 m,厚高比 0.11。坝和地基连接处设有周边缝和底座。泄洪设施有:①坝顶 5 个表孔,每个宽 11 m,高 4.5 m,总泄流量 1400 m³/s;②坝内 2 条泄水管,总泄流量 1600 m³/s;③左岸 1 条龙抬头式泄洪隧洞,泄流量 3400 m³/s。坝内还设有 2 根直径 2 m 的钢管,装有锥形阀,供事故放水用。

发电厂房布置在左岸地下，内装 3 台单机容量为 78 MW 的水轮发电机组，其出线经竖井引至地面，然后升压输出。

工程于1969年12月8日开工,1974年9月竣工。

二级青山水电站 装有4台单机容量为90MW的水轮发电机组。坝址以上流域面积617.3 km²。总库容72.5万m³。正常蓄水位1245.0 m,调节库容59万m³。大坝为混凝土重力坝,最大坝高45 m,坝顶长100 m。引水隧洞直径6.6 m,长5436.5 m。厂房为地下式。工程于1964年7月开工,1970年12月竣工。

三级谷关水电站 装有 4 台单机容量为 45MW 的水轮发电机组。坝址以上流域面积 707.7 km²。正常蓄水位 950 m。调节库容 903 万 m³。大坝为混凝土拱

Dan` 丹

1条压力隧洞引水,隧洞为圆形断面,全长7105 m,洞径由7.7 m渐变为6.9 m,末端设阻抗式调压井,内径10 m,井高220 m,井内全部采用钢板衬砌,钢板最大厚度29 mm。调压井后侧为3条平行布置的压力管道,长1801 m,其上平段长52 m,斜管段长1465 m,坡度为0.65,下平段长284 m。压力管道最大设计水头840 m,全部采用钢板衬砌,钢板最大厚度46 mm。3条压力管道分岔为6条支管。其中3条支管引至地面厂房内4台常规机组,尾水泄入下水库;另3条支管引至地下厂房内8台可逆式机组,经8条尾水管汇成2条洞径4.6 m,长174 m向上斜坡的尾水隧洞泄入下水库。

厂房 设地面厂房和地下厂房各1座,采用重叠布置,其间高差70 m。地面厂房内装4台单机容量为150 MW的常规冲击式机组,地下厂房内装8台单机容量为150 MW的可逆式机组。

机组设备 8台可逆式机组的水泵水轮机为立轴四级混流式水泵水轮机,转轮直径2.215 m。水轮机工况,工作水头821.5~955 m,单机流量 $18.1 \text{ m}^3/\text{s}$,额定出力152.5 MW。水泵工况,抽水流量 $17.3 \text{ m}^3/\text{s}$,最大输入功率157 MW。发电电动机为半伞式,额定出力 $170 \text{ MV} \cdot \text{A}$,额定电压15.5 kV,额定转速600 r/min。4台常规机组由5喷嘴冲击式水轮机和悬式发电机组成。水轮机工作水头812~922 m,转轮直径2.7 m,单机流量 $19.5 \text{ m}^3/\text{s}$,额定出力158.5 MW。

工程费用 总造价为43.17亿法郎(1982年1月价格水平)。其中土建工程占51%,机电设备占29%,交通设施占7%,电气线路和办公室占1%,场地与基础设施占4%,不可预见费占8%。

(熊思政)

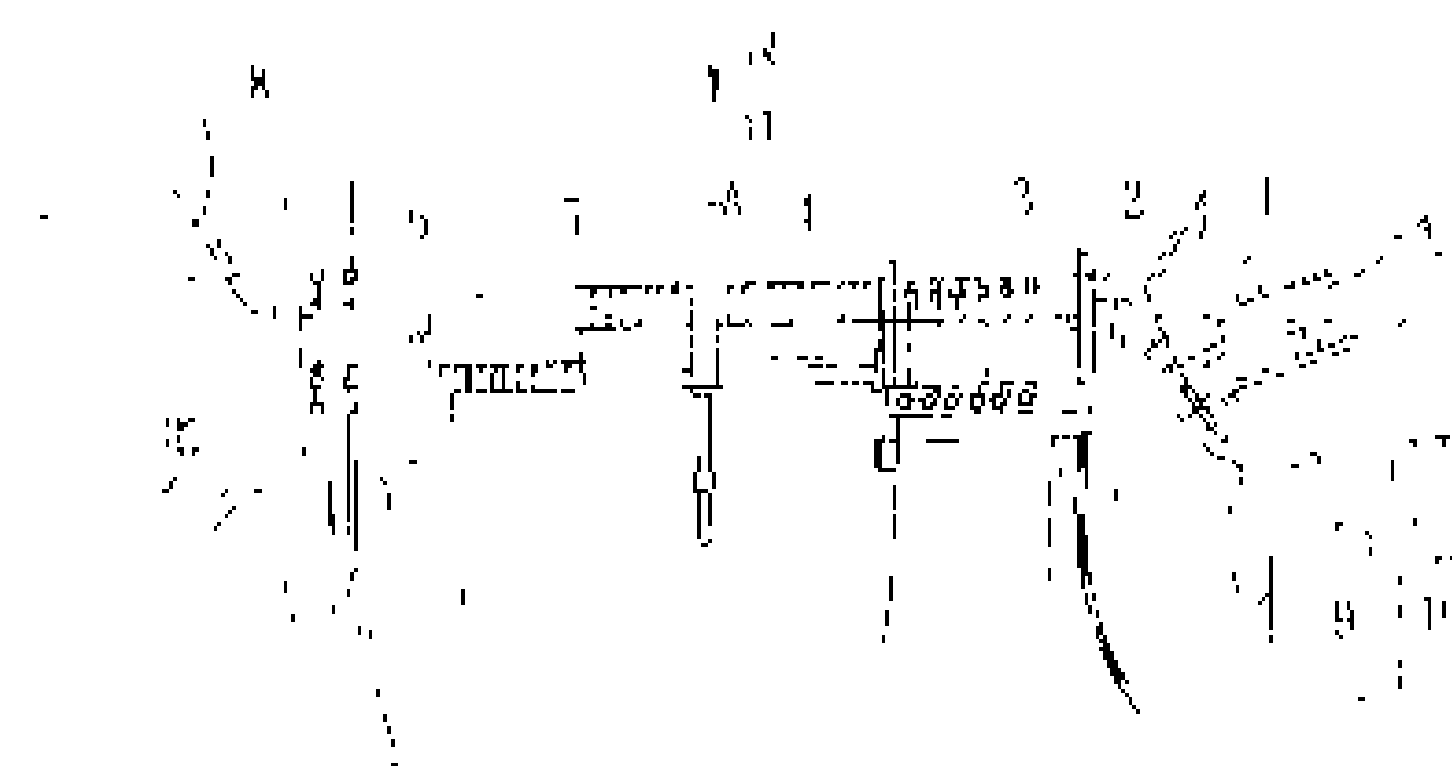
Danjiangkou Shuili Shumu.

丹江口水利枢纽 (Danjiangkou Hydroproject) 位于湖北省丹江口市汉江干流上,具有发电、防洪、灌溉、航运、养殖等综合利用效益。工程分两期建设,初期装机900 MW,保证出力247 MW,多年平均年发电量38.3亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,以220 kV和110 kV电压接入华中电力系统。主坝为混凝土宽缝重力坝,最大坝高97 m。一期工程1958年9月开工,1968年第一台机组发电,1974年竣工。二期工程尚未进行。(参见彩图插页第10页15图)

水文和水库特性 坝址以上流域面积95217 km^2 ,多年平均径流量378亿 m^3 ,多年平均流量 $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ 。设计洪水标准为:千年一遇设计,万年一遇校核。设计洪水流量 $64900 \text{ m}^3/\text{s}$,相应库水位159.8 m;校核洪水流量 $82300 \text{ m}^3/\text{s}$,相应库水位161.3 m。水库

正常蓄水位157 m,防洪限制水位149 m,死水位139 m。水库总库容209.7亿 m^3 ,调节库容102.2 m,死库容72.3亿 m^3 ,防洪库容77.2亿 m^3 。为多年调节水库。电站最大水头81.5 m,设计水头63.5 m,最小水头57 m。

枢纽布置 一期工程,主坝坝顶高程162 m,坝顶总长2494 m,其中混凝土坝长1141 m,两岸土石坝总长1353 m。枢纽由左岸土石坝段、左岸连接坝段、厂房坝段、溢流坝段、深孔泄洪坝段、升船机、右岸连接坝段和右岸土石坝段等主要建筑物组成,见图。



丹江口水利枢纽平面布置图

1-左岸土石坝段;2-左岸连接坝段;3-厂房坝段;4-溢流坝段;5-深孔泄洪坝段;6-升船机;7-右岸连接坝段;8-右岸土石坝段;9-220 kV开关站;10-110 kV开关站

坝后式厂房内安装6台单机容量为150 MW的竖轴混流式水轮发电机组(参见彩图插页第25页42图),经埋设在坝内的6条直径7.5 m的压力钢管引水发电。水轮机转轮直径5.5 m,额定转速100 r/min,额定出力154 MW,最高效率92.8%。发电机为伞式空冷型,额定电压15.75 kV,额定容量 $176.5 \text{ MV} \cdot \text{A}$,额定功率因数0.85,定子铁芯内径12.8 m。发电机电压侧采用发电机-变压器组单元接线,高压侧采用双母线带旁路接线。220 kV和110 kV屋外开关站设在左岸下游台地上。

船舶过坝设施布置在右岸。上段采用垂直升船机,最大提升高度50 m,设计载重能力150 t。下段为斜面升船机,轨道长350 m,坡度1:7。连同上下游导墙,过坝设施总行程1166 m,设计年过坝运输量83万t。

上游距坝址30 km处,设两座灌溉取水渠首:挑岔渠首,引水流量 $500 \text{ m}^3/\text{s}$;清泉渠首,引水流量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 。两座渠首引水高程均为146.5 m。

泄洪设施 深孔泄洪坝段设置12孔深水泄水孔。孔口宽5 m,高6 m,底坎高程113 m,最大泄流量 $9680 \text{ m}^3/\text{s}$ 。溢流坝段设20孔溢洪道。孔口宽8.5 m,高22.5 m,堰顶高程138 m,最大泄流量 $39900 \text{ m}^3/\text{s}$ 。6台机组最大引用流量 $1658 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

运行效益 该电站为华中电力系统的主要电源之一,自1968年投产以来,发挥了调峰、调频和事故备用电源作用,至1990年底已累计发电823.19亿kW·h。水库建成后,使下游河道防洪标准由六年一遇提高到二十年一遇,配合分洪工程,可提高到百年一遇。百年一遇洪峰流量经调蓄后可由51200 m³/s减少到13200 m³/s。灌溉面积达到360万亩。使上下游航道850 km得到改善。建库后,渔业得到很大发展,捕捞量由1969年前的每年8.6万kg增加到每年650万kg。

设计和施工单位 长江流域规划办公室设计,水利电力部第十工程局施工。

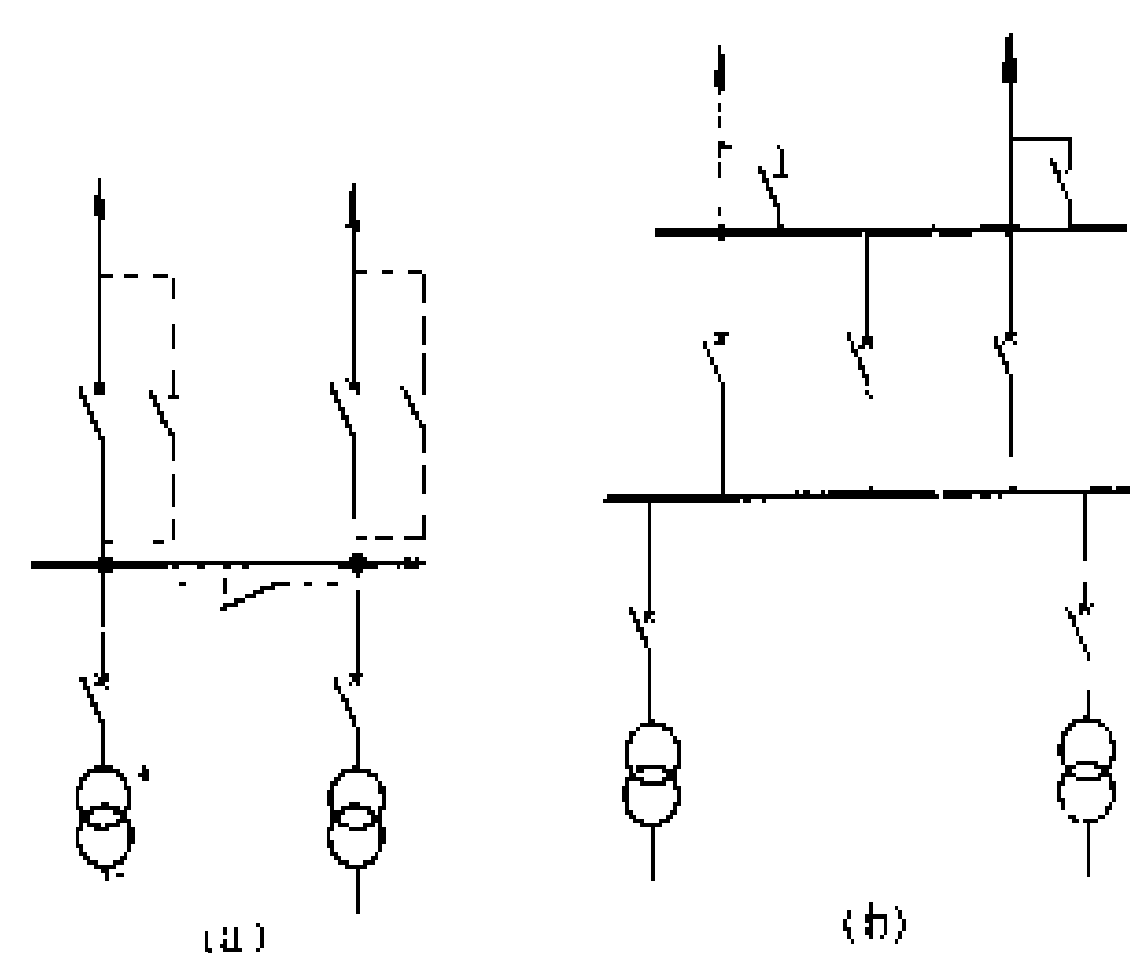
(李维藩)

dan muxian jieshan

单母线接线 (single-bus connection) 电源和出线回路汇集在一条汇流母线的电路。这种接线的特点是每个电源和每回出线都经断路器接到一条公共母线上。

常用的接线方式有单母线不分段接线、单母线隔离开关或断路器分段接线、单母线带旁路母线接线以及单母线分段出线带旁路隔离开关接线。

单母线不分段接线 将电站全部出力的汇集和分配由一条汇流母线来完成,见图(a)实线部分。优点是:①接线简单、清晰。②每一进出线回路各接一组断路器,正常运行操作由断路器进行,便于实现自动化、远动化。③断路器与进出线回路数相等,设备少,投资省,继电保护简单,对35~110 kV电压等级,有利于采用成套配电装置或手车式断路器,布置紧凑。缺点是:①断路器检修时,所连接回路需停电。②连接在母线上的元件故障或母线故障停电检修时,将造成全电站停电。



单母线接线图

(a) 单母线接线; (b) 单母线带旁路母线接线

单母线分段接线 将图(a)所示单母线用隔离开关或断路器分段,即成单母线分段接线。图中用虚线示

出采用隔离开关分段。

(1) 采用隔离开关将母线分段。优点是:①接线简单、清晰。②正常运行操作由断路器进行,便于实现自动化。③设备少、投资省。④当一段母线故障后,用母线分段隔离开关将故障的母线段分开后就能恢复非故障母线段的正常运行。⑤母线可分段检修,不致全电站停电,可靠性较母线不分段接线稍有提高。缺点是:①断路器检修时,所连接的回路需停电。②连接在母线上的元件故障或母线、分段隔离开关停电检修,将造成全电站停电。③采用分段隔离开关,不利于电站实现自动化和远动化。

单母线隔离开关分段接线(包括前述的单母线不分段接线),一般适用于在电力系统中不重要且对供电连续性要求不高的中型水电站。其出线电压为35~60 kV、回路数一般少于4~5回或出线电压为110 kV、回路数一般少于3~4回且线路输送容量较小。

(2) 采用断路器将单母线分成两段或多段的接线方式,比单母线隔离开关分段接线增加了可靠性。优点是母线及连接元件故障,只影响一段母线及所连接的回路停电。缺点是增加了分段断路器,投资、布置面积稍有增加。

单母线断路器分段接线,一般适用于在电力系统中不十分重要的水电站。对重要负荷一般用两回路分别接在两段母线上供电。这些电站的出线电压为35~60 kV、回路数一般少于8回或出线电压为110~220 kV、回路数一般少于4~6回。

单母线带旁路母线接线 在单母线接线或单母线分段接线的出线增设了旁路母线和旁路断路器的接线方式见图(b)。优点是出线断路器检修时可用旁路断路器替代,提高了供电可靠性。缺点是增加了旁路母线和旁路断路器等设备的投资,布置面积也相应增大。

单母线或单母线断路器分段带旁路母线接线,一般适用于出线断路器检修频繁,线路停电影响大又不允许经常停电的中型水电站。

单母线出线带旁路隔离开关接线 单母线接线不分段或用断路器或隔离开关分段并为出线断路器增设旁路隔离开关的接线方式,如图(a)中虚线所接隔离开关所示。优点是出线断路器检修时可用旁路隔离开关替代,给运行、检修带来一些方便。缺点是此时若线路故障即相当于母线故障,扩大了故障范围。当单母线用断路器分段时,则故障范围可限制在一段母线上。

单母线带旁路隔离开关接线,一般适用于出线电压在110 kV以下,回路数不多,采用旁路母线又不甚合理,而电站和电力系统运行条件又允许采用旁路隔离开关的中型水电站。

(潘天缘)



danwei xishuiliang

单位吸水量 (specific water absorption)

通过钻孔压水试验测得的岩体原位渗透性指标。其意义是在 0.01 MPa 压力下，每米试段长度内岩体每分钟的吸水量 [L/(min·m·0.01 MPa)]，是评价岩体渗透性和设计防渗帷幕的基本数据。

压水试验是以恒定的压力将清水压入钻孔试验段的原位渗透试验。一般随钻孔的加深，自上而下分段进行。试验段用栓塞隔离后，用水泵或自流供水向试段内压水，量测在规定压力下一定持续时间内的稳定耗水量，即可计算得出该试验段岩体的单位吸水量(ω 值)，见下式

ω = Q/(SL)

式中 Q 为压入稳定耗水量,L;L 为试验段长度,m;S 为试验压力,MPa;ω 为单位吸水量,L/(min·m·0.01 MPa)。

SDJ14-78《中国水利水电工程地质勘察规范》依据单位吸水量值，对岩体透水性分级如下:

透水性分级	ω 值 [L/(min·m· 0.01MPa)]	透水性分级	ω 值 [L/(min·m· 0.01MPa)]
极严重透水	>10	中等透水	0.1~0.05
严重透水	10~1	微透水	0.05~0.01
较严重透水	1~0.1	极微透水	<0.01

SDJ21-78《中国水利水电工程重力坝设计规范》(试行)对于防渗帷幕底部岩体的单位吸水量值，规定应达到下表标准。

坝 高	ω 值 [L/(min·m·0.01MPa)]	
	混凝土坝	土石坝
高 坝(>70m)	<0.01	0.03~0.05
中坝(70~30m)	0.01~0.03	0.05~0.1
低 坝(<30m)	0.03~0.05	

单位吸水量与国际惯用的坝基岩体防渗指标——透水率(吕荣单位)在试验方法上不同，吕荣试验采用多级压力循环压水方法，试验成果用透水率(吕荣单位 Lu)表示：即在 1 MPa 压力下，每米试段长度内岩体每分钟的吸水量为 1L 时为 1 吕荣单位(1Lu)，大致相当于 ω 值为 0.01 L/(min·m·0.01 MPa)。

(邹小安)

daobaoquan

导爆管 (primacord tube) 非电引爆雷管

的管状爆破器材。导爆管呈乳白色，为带灰色半透明的热塑性塑料软管，管内壁涂有一薄层高敏感猛性炸药和工业附加物，爆速 2000 m/s，用明火不能引爆，抗冲击，作用可靠，重量轻，运输方便，保管安全，对周围环境无影响，能抵抗一切杂散电流，它除不适用于有瓦斯或矿尘爆炸危险的地下工程外，可供任何爆破作业使用，是 20 世纪 70 年代开始发展的爆破器材。

导爆管的作用过程是在用卡发枪或雷管引爆后，管壁炸药在瞬间分解，所产生爆轰(见导爆索)形成冲击波，根据管道效应原理，不断激发管壁炸药的化学反应，补充传播过程所耗能量，稳定地沿着管道向前推进，使整个管道呈白光，声响不大，管壁无破损，手感有轻微脉动，直至引爆导爆管末端的雷管，再由雷管引爆炸药。在组织爆破网络时，可用装有导爆管的连接块连接，或将两段管口对接后用胶布裹好，同样可以导爆。

(王守道)

daobaoqiao

导爆索 (primacord) 可以直接引爆与其接触的炸药的索状爆破器材，又称爆炸导火索或传爆线。根据用途可以分为一般爆破作业的露天导爆索和用于有瓦斯和矿尘爆炸危险的安全导爆索。

露天导爆索有普通导爆索、高抗水导爆索、强起爆力导爆索和低能导爆索等。普通导爆索与导火索相似，只是芯药采用威力大、爆速高的高敏感猛性炸药。外层涂丹红色或灰白与丹红间色以与导火索区别，爆速约 6500 m/s。

导爆索必须用雷管等的有足够能量的爆轰(即猛性炸药瞬间分解时对周围产生巨大破坏作用的能量)才能引爆。用导爆索起爆药包可以象电爆网络一样连接成导爆索网络。敷设网络时采用搭接或水手结连接，搭接长度一般不少于 150 mm，搭接处要捆扎牢固，支索与主索传爆方向的夹角不大于 90°。导爆索不能折角，挽圈，并尽量避免交叉。

(王守道)

daohuoxiao

导火索 (detonating fuse) 用以引爆火雷管和黑火药的索状点火器材。导火索以黑火药作芯药，用涂有防潮剂的纸条包裹，外缠麻、棉线，表面呈灰白色，正常燃速 100~120 s/m。

在一般爆破作业中可用导火索起爆药包。但不宜用于竖井、斜井、深孔及有瓦斯和矿尘爆炸危险的地下工程。对人员借助长梯子、绳索等才能点火，而且较难撤至安全地点的爆破工程也不能采用导火索。所裁导

火索长度要能保证点炮人员在燃完规定导火索后撤退至安全地点,且不短于 1.2 m。导火索用专门点火用的导火索或点火棒、点火筒点火。

(1) 点火用导火索是用麻线或棉线在硝酸钾溶液中浸渍,表面用棉线缠绕。燃速依芯线材料而异。

(2) 点火棒是用涂腊纸制成的圆棒,一端装有点火剂和信号剂,另一端为握手的惰性物,用以直接点燃导火索。当操作中信号剂发出绿光时,人员应立即撤离现场。

(3) 点火筒是用涂腊纸做成的圆筒,一端敞开,可以放入成束的导火索同时点火,筒底装有药饼,筒的另一端封闭。

(王守道)

daoliu mingou

导流明渠 (diversion channel) 见导流泄水建筑物。

daoliu suidong

导流隧洞 (diversion tunnel) 见导流泄水建筑物。

daoliu xieshui jianzhuwu

导流泄水建筑物 (diversion outlet structure) 施工导流中将河水导向下流的临时性泄水建筑物。常用的导流泄水建筑物有导流明渠、导流隧洞、导流底孔、导流涵洞等,也可采用渡槽或利用厂房尾水管作为导流泄水建筑物。

导流明渠 一般适用于岸坡较缓、有较宽阔的滩地或有老河道等可资利用地形地质条件、适于布置导流明渠的河道上。导流明渠过流能力大,施工比较简便,并易于解决施工期通航、过木、排冰等要求。导流明渠一般均通过修建坝体的部位,常用于分期分段施工的重力式混凝土坝、闸的导流。施工后期应按主体建筑物结构要求进行改建或封堵。

导流明渠 的布置,应尽量减少弯道,力求水流通畅,避开滑坡、崩塌体等地质不良地段及高边坡开挖区,保证泄水安全,并使挖填方量小,施工方便。导流明渠伸出上、下游围堰外坡脚的距离应满足堰基防冲要求,并尽可能使进出口水流平顺。明渠一般均布置在一岸,要考虑防冲防淤要求。明渠断面多采用梯形或矩形。断面尺寸由导流设计流量确定,有时还需考虑通航、过木及排冰等要求。

导流隧洞 一般适用于河谷狭窄,两岸岸坡陡峻的山区河流上,多用于断流围堰导流方式。由于隧洞造价较高,且占用工程布置的场地位置,所以尽可能将它

改建为永久性建筑物。专用的导流隧洞,在导流任务完成后封堵。

影响隧洞布置的主要因素有地质条件与水力条件两方面。隧洞宜布置在新鲜、完整的岩层中,一般尽量避免洞线穿过不良地质构造及较大的冲沟。无法避免时,则使洞轴线与断层、破碎带走向的交角尽量大一些。导流隧洞轴线的选择尽可能使水流顺畅,宣泄能力强。其进出口与上、下游围堰应有足够距离,以防堰基受水流冲刷。隧洞进出口高程的确定,应兼顾导流、截流、通航、放木等要求,并考虑洞身施工时出渣、排水等因素。

导流隧洞断面形式,主要取决于地质条件、隧洞工作条件和施工条件,以及是否有利于截流等因素。常见的有圆形、马蹄形及方圆形(或称城门洞形)3种。隧洞断面尺寸主要取决于地质条件与导流流量,还要考虑围堰高度与洞径之间的关系,通过综合比较,选择最佳洞径。

隧洞是否需要衬砌,根据地质条件及隧洞工作条件而定,地质条件较好或后期不改建为永久工程使用的导流隧洞,一般可不衬砌或局部衬砌。

导流底孔 在修建混凝土坝或浆砌石坝时,常在坝身下部的坝段内设置泄水孔作为导流泄水建筑物。当采用断流围堰导流时,常作为后期导流的泄水建筑物。当采用分期围堰导流时,常作为二期工程的导流泄水建筑物(见分期围堰导流)。

导流底孔可单独泄流,也可与坝体预留缺口等联合泄流。底孔断面形式有方圆形、矩形或圆形。导流底孔设置数量、高程及其尺寸,应兼顾导流、截流、过木、排冰及水库下闸蓄水等要求。利用永久泄洪、排沙和水库放空底孔兼作导流底孔时,应同时满足永久和临时运用要求。封堵坝内临时底孔,可回填与坝体同标号的混凝土。导流底孔与坝体缺口宜错开布置,当不能错开时,应处理好顶部溢流与底孔出流的交会。设置导流底孔时,应尽量减小底孔糙率,力求水流平顺,加大流量系数,提高宣泄能力,并注意避免底孔淤塞,防止下游冲刷。

导流涵洞 可用于导流流量不大的中、小型土石坝工程,一般在坝基部位设置涵管穿过基坑和上、下游围堰,作为采用断流围堰导流方式的泄水建筑物、或分期导流方式的后期导流泄水建筑物。

涵洞在露天施工,具有施工方便、速度快、造价低等优点。涵洞一般在坝下,既可设在岸边表露的基岩漫滩上,也可在河床设置。涵洞一般是钢筋混凝土结构,也可用浆砌石修建。在某些情况下,还可在建筑物岩基上开出一条沟槽,做好衬砌,顶部加上混凝土或钢筋混凝土顶盖而形成涵洞。当涵洞设在软基上时,须对管道

结构及基础采取加固措施,分段设置伸缩缝,避免涵洞由于产生不均匀沉陷和温度应力引起裂缝,尤其要注意涵洞与坝基结合,做好防渗措施,防止沿涵洞渗漏,引起失事。涵洞轴线宜顺直,进出口要求与隧洞、底孔的要求相同,应有良好型式,使水流顺畅,不产生冲刷或淤积,出口消能防冲措施要可靠。导流涵洞在导流任务完成后进行封堵或改建为永久工程使用。

(陈魁芳)

daoshui jigou

导水机构 (water guide mechanism; distributor) 形成水流环量并调节水轮机流量的部件的总称。混流式水轮机和轴流式水轮机导水机构引导水流径向流入水轮机,灯泡式和斜流式水轮机导水机构水流引导斜向流入水轮机,全贯流式水轮机导水机构引导水流轴向流入水轮机。导水机构包括导水叶、导水叶传动机构(包括拐臂、联杆等)、控制环、底环、顶盖以及接力器等,见图1。

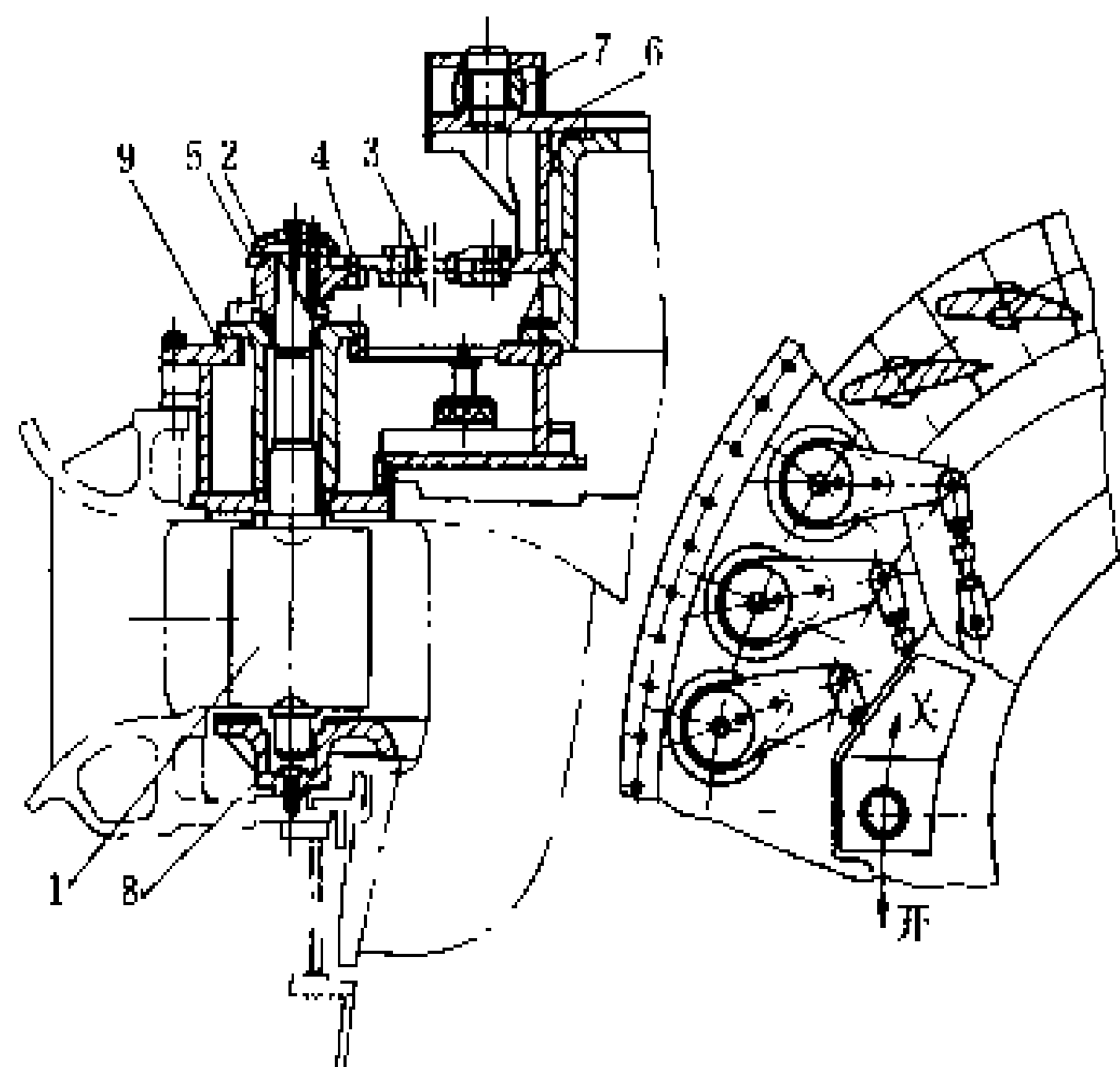


图1 径向导水机构

- 1 导水叶; 2 拐臂; 3 联杆; 4 剪断销; 5 连接板;
6 控制环; 7 推杆; 8 底环; 9 顶盖

导水叶 导水叶(见图2)由流线形导水叶体及上、中、下轴颈组成,在高水头中小型机组上有取消下轴颈的,以便于装拆和调整。导水叶体过流表面应有足够的光洁度,以减少水力损失。标准导水叶有对称型和非对称型两种,高比转速(例如 $n_s \geq 100 \text{ m} \cdot \text{kW}$)轴流式水轮机流速低,使用对称导水叶体,中、低比转速水轮机流速高,使用非对称导水叶体。导水叶全关时应有可靠的封水性能。中高水头水轮机的导水叶立面间隙用金属接触密封,低水头的用橡胶带密封。导水叶材料应有良好的抗汽蚀和泥沙磨损性能,一般采用铸钢整铸,也有用钢板压成中空导水叶体后再和轴颈组焊

的。为提高导水叶的抗磨蚀性能,必要时用不锈钢制造,或在密封面和轴颈处堆焊不锈钢。导水叶轴承过去用铸锡青铜制造,黄油润滑,近来用有自润滑性能的钢背复合工程塑料轴瓦。

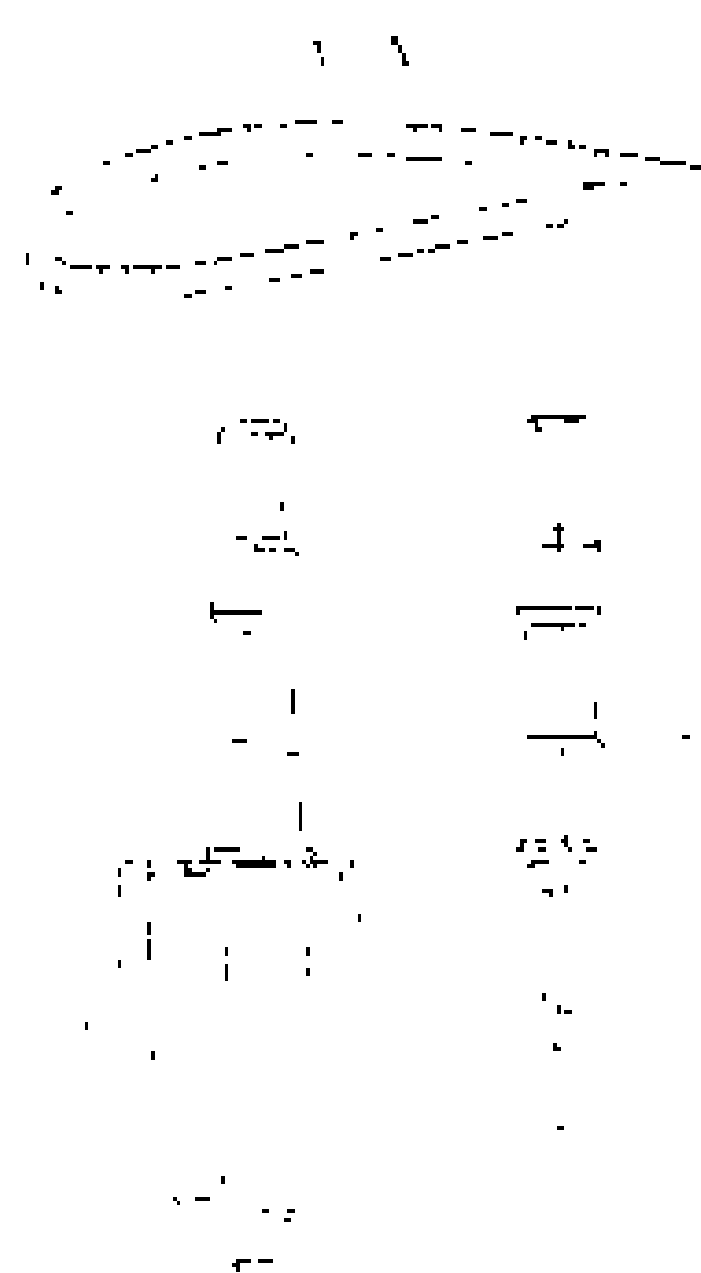


图2 焊接导水叶
1—上轴颈; 2 中轴颈; 3—下轴颈; 4—导水叶体

导水叶传动机构

导水叶传动机构由拐臂、联杆、剪断销、连接板等组成,控制环通过连杆拐臂等带动导水叶转动,开关导水叶。为了保护传动机构不受损坏,设有保护装置,常用的有剪断销、破断螺丝、摩擦传动拐臂或塑性易弯拐臂等几种,当导水叶之间卡有异物时,它们首先破断或变形。后面两种还具有防止导水叶自由摆动引起连锁反应的性能。

控制环 是把接力器的操作力传递给导水叶传动机构的环形部件,见图3。它有和接力器推杆连接的耳环及和联杆连接的销子孔。常用铸钢铸造或钢板焊接,受运输限制可设计成分瓣结构。

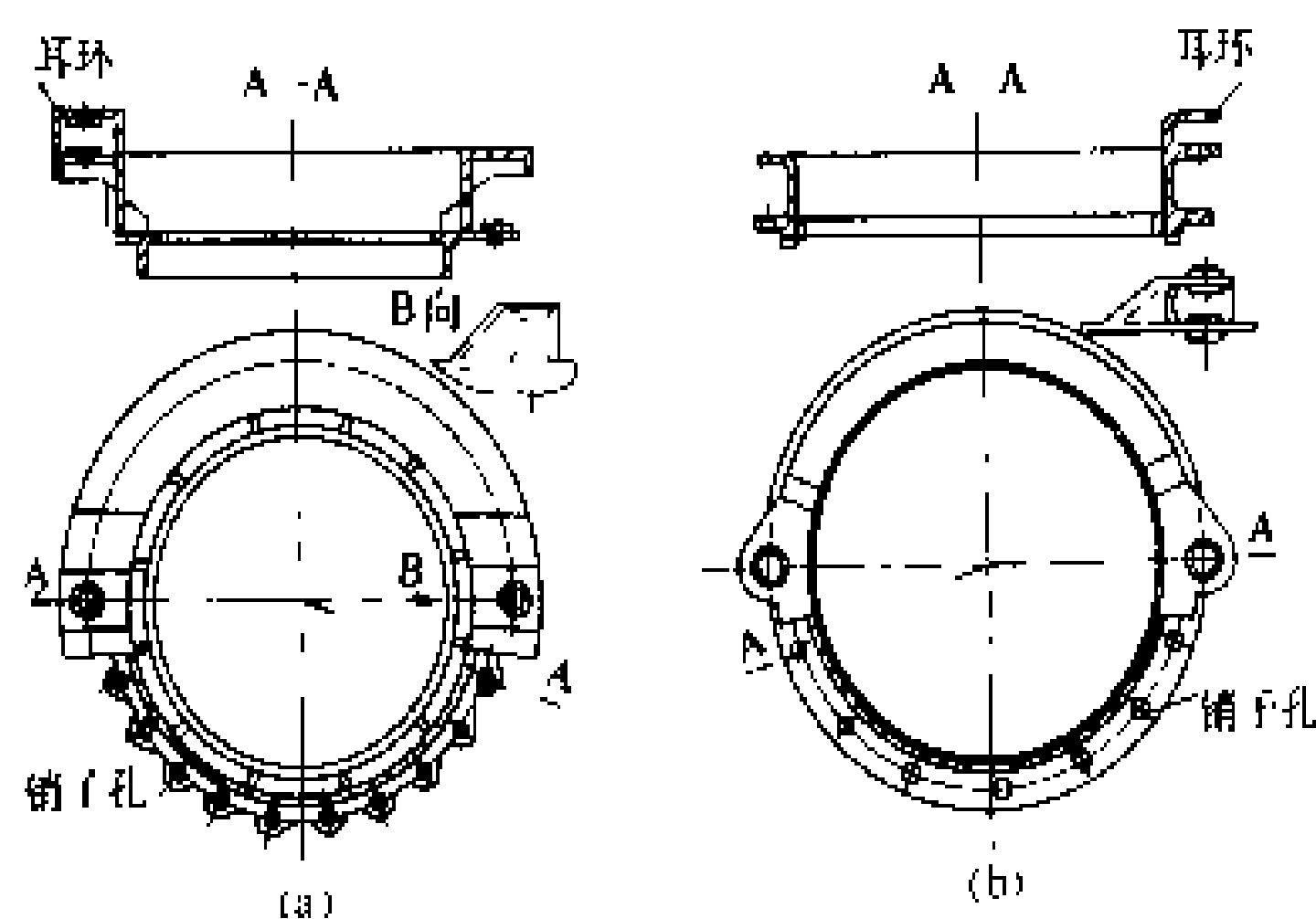


图3 控制环

(a) 焊接结构; (b) 铸造结构

接力器 将调速器输出的压力油能转变为操作导水叶传动机构的机械能。小型水轮机由调速器内的接力器直接驱动调速轴操作导水叶传动机构。大中型水轮机配有专门的接力器操作导水叶传动机构。接力器有直缸、环形、摇摆几种型式。多数机组用两个,也有用一个的,少数机组每个导水叶配一个接力器。典型的直缸接力器见图4。它由接力器缸、后缸盖、前缸盖、导管、锁锭、活塞、活塞杆等组成,分别用铸铁、铸钢或锻钢制造。额定操作油压一般用2.5 MPa、4.0 MPa及7 MPa等,中国用得最多的是2.5 MPa。

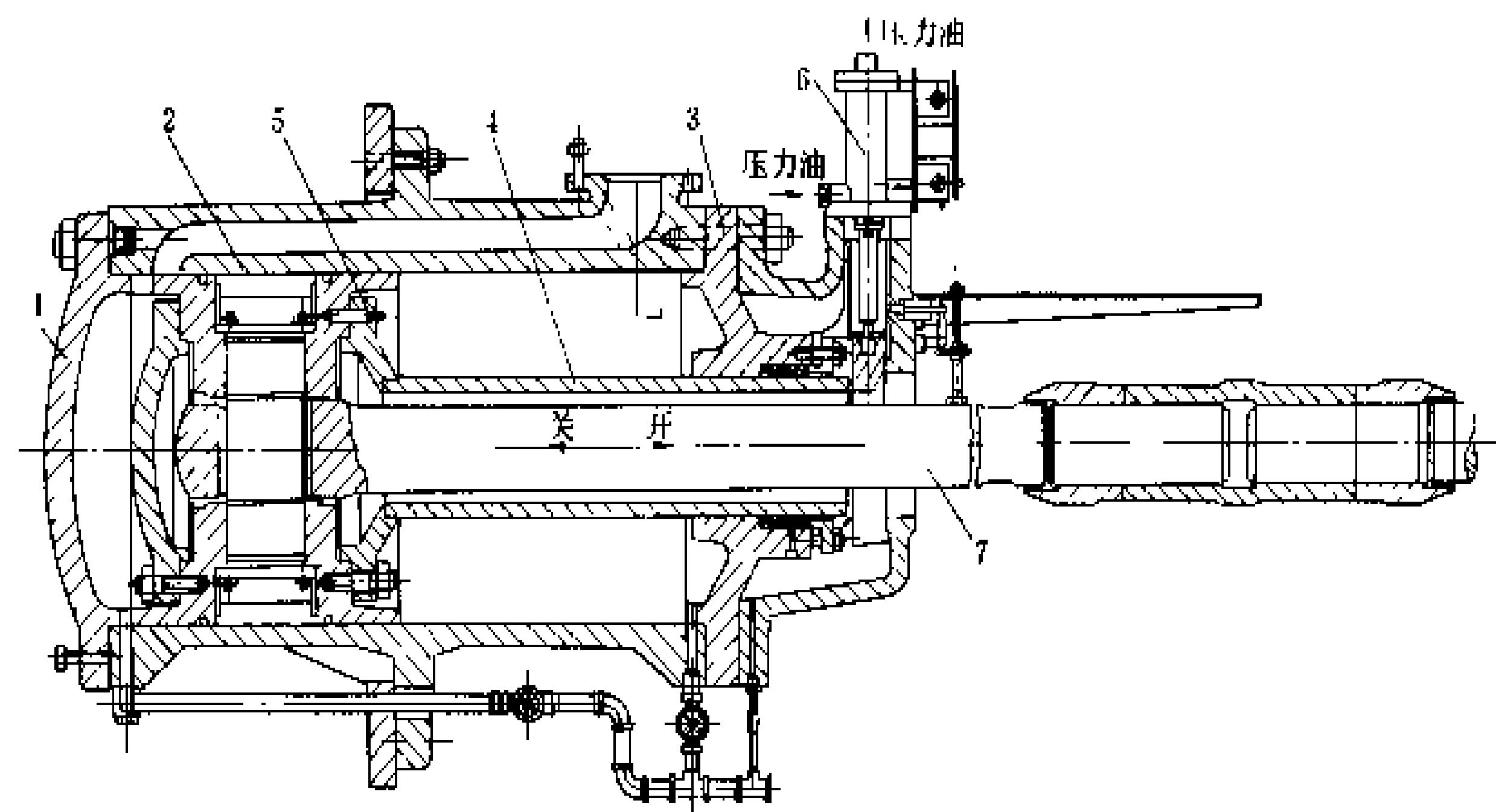


图4 直缸接力器

1—后缸盖；2—接力器缸；3—前缸盖；4—导管；5—活塞；6—锁锭；7—活塞杆

(吴次光)

dengpaoshi shuilunfadianji

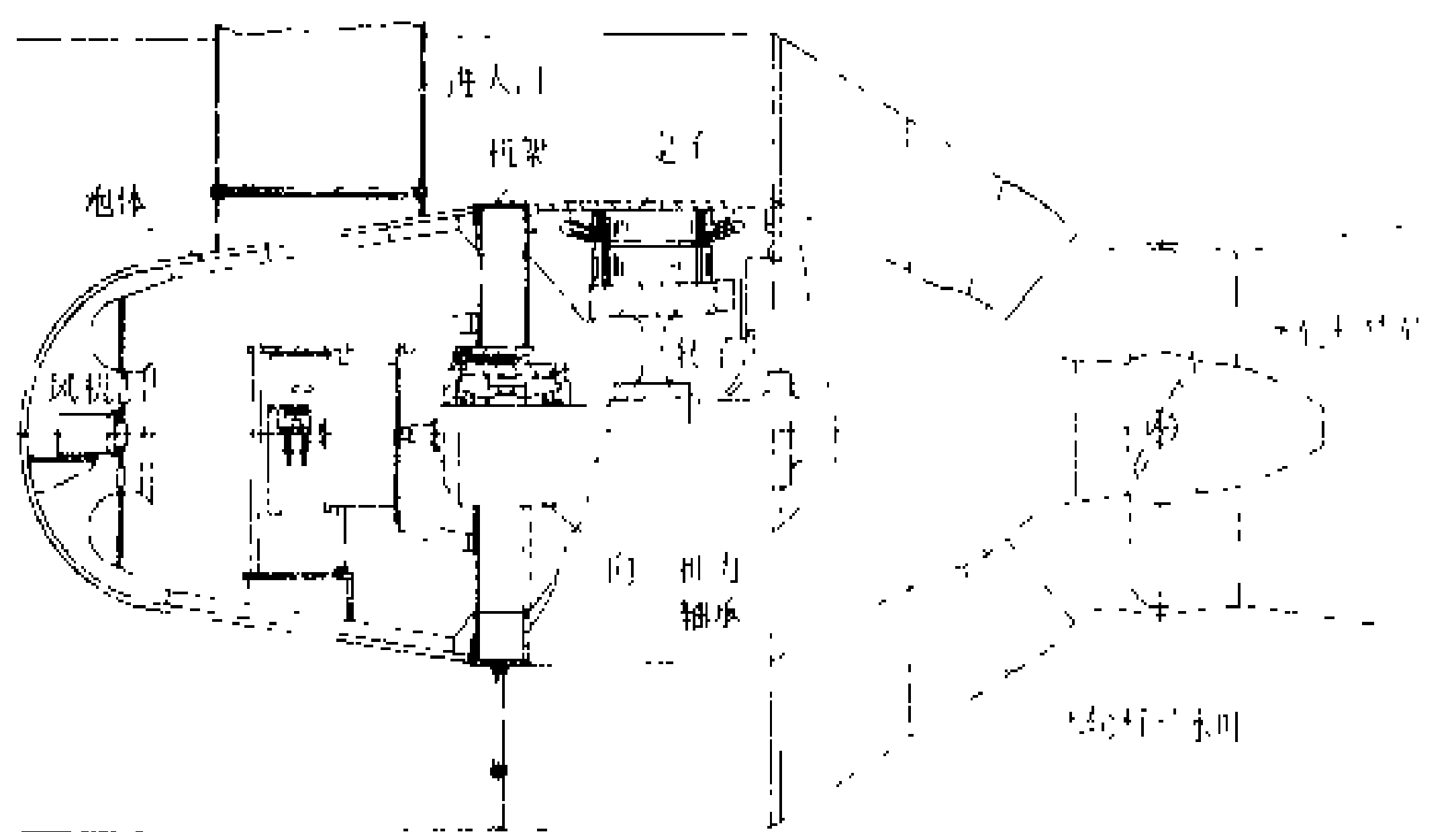
灯泡式水轮发电机 (bulb type hydrogenerator)

将发电机与轴承等布置在形似灯泡的密封壳体内的水轮发电机。灯泡式水轮发电机与水轮机直轴连接并布置在流道内,其特点是结构布置紧凑、复杂,具有防潮防漏等特殊要求。由于灯泡式水轮发电机装在水下流道内,停机时绕组容易受潮,因此其额定电压比一般水轮发电机低。转子励磁绕组极间空间位置较小,励磁安匝数受到限制,故选用较高的功率因数,使 x_d' 值增大,以降低成本。灯泡式机组的水轮发电机转动惯量及惯性时间常数较小,故机组甩负荷时的转速上升率 β 值较大,一般大于45%,飞逸转速可达额定转速的2.5~3.5倍。与同容量立式水轮发电机相比,灯泡式机组额定转速可提高10%以上,发电机内径可减少25%以上,整个机组的重量(包括水轮机)可减轻25%,是较经济合理的一种机型,多用于工作水头范围为3~25 m的低水头水电站。灯泡式水轮发电机组结构剖面见图示。

灯泡比 定子机座外径与水轮机转轮外径的比值称为灯泡比。它是灯泡式水轮发电机组的一个重要特征参数,通常取0.9~1.1。灯泡比过大将使水轮机的水力特性变坏,机组效率降低;灯泡比过小将使铁芯长度增加,转动惯量减小,甩负荷时转速上升率增大,对通风散热不利。

冷却方式 灯泡式机组由于转速低、直径小、定子铁芯长度大,使自然通风产生的风压往往不能达到预期的效果。除可按常规水轮发电机采用的密闭循环通风冷却或水内冷的冷却方式外,还可采用定子铁芯贴壁冷却或增压冷却。贴壁冷却是定子铁芯采用贴壁结构,利用水流带走灯泡体散发的热量。增压冷却是在灯泡体内充压,增强散热能力,可提高机组的综合效率和降低灯泡比,但需增设充压设备和提高泡体的密封性能,并对运行人员进入泡体内检查维护带来不便,通常增压的最优压力可取200~300 kPa。

发展简史 1936年瑞士设计了第一台灯泡式水轮发电机,装在路斯汀(Rostin)水电站。50年代以来,法国、日本、苏联、挪威等国家建成了一批灯泡式水电站。1978年美国在哥伦比亚州的石岛(Rock Island)电站安装了额定容量为54 MW的灯泡式机组。日本正在为只见(Tadami)水电站制造额定容量为65 MW的



灯泡式水轮发电机组结构剖面

灯泡式机组。中国制造的第一台40 kW灯泡式水轮发电机于1964年投入运行,60年代末研制了1600 kW的灯泡式机组,80年代初在马迹塘水电站投产了3台进口18.05 MW的灯泡式机组,1984年在白垢水电站投运了国产额定容量为10.47 MW的灯泡式机组。1992年安居等水电站投运了国产额定容量为1.5 MW的灯泡式机组。

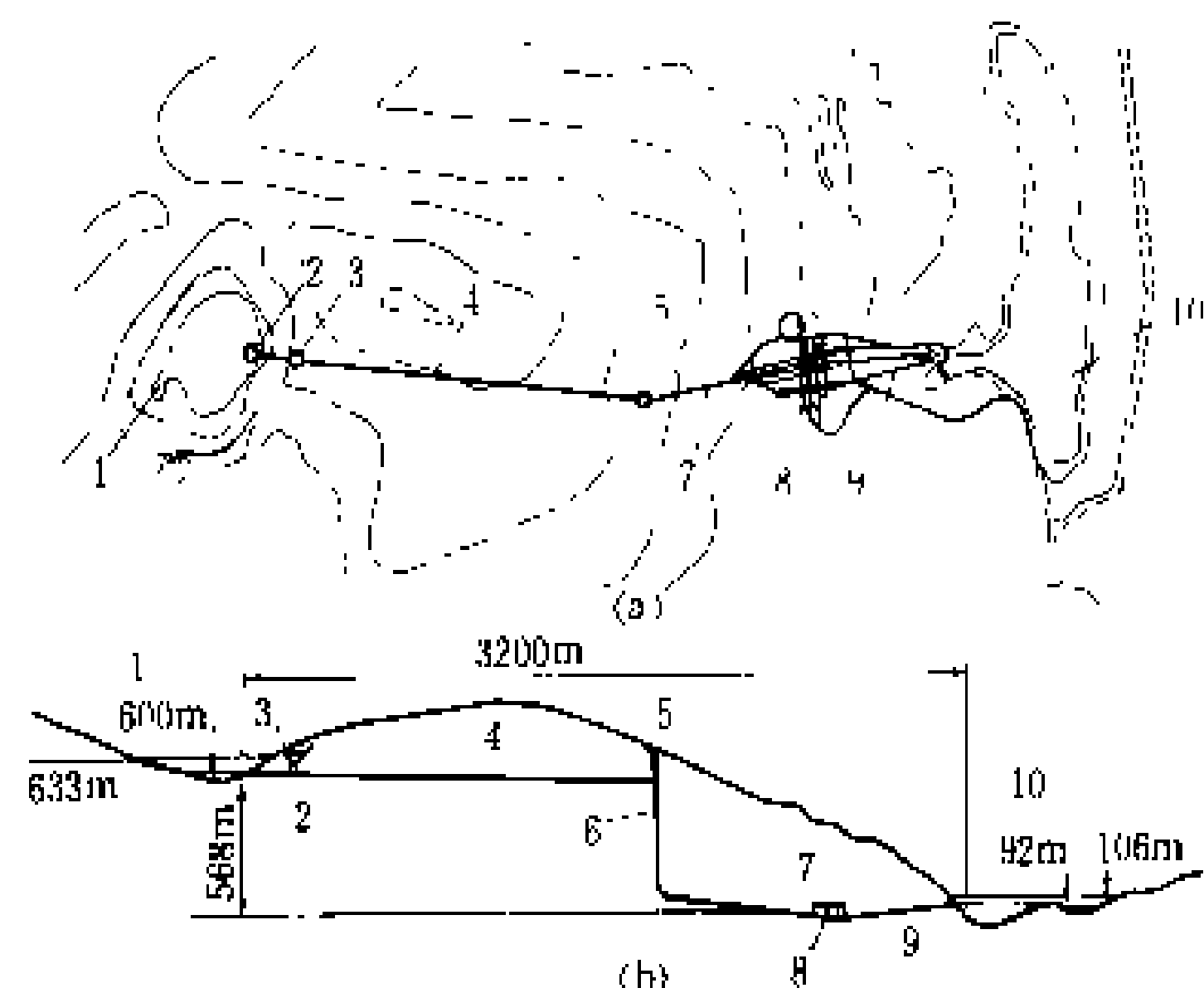
(邱景安)



Dinorwike Choushui Xu' neng Dianzhan

狄诺维克抽水蓄能电站 (Dinorwic Pumped Storage Power Station)

纯抽水蓄能电站,位于英国威尔士东北部班戈尔(Bangor)市的南面。装机容量1800 MW,以400 kV超高压输电线接入英国统一电力系统。利用电力系统低谷负荷时多余的廉价电能抽水,提供系统尖峰容量。当系统中2台660 MW大型火电机组同时发生事故时,可在10 s内投入1320 MW备用容量。作为系统主要调频电站,可使系统频率控制在49.5~50.2 Hz范围内。工程于1974年开工,1982年12月开始投入,1984年完成。总体布置见图。



狄诺维克抽水蓄能电站总体布置

(a) 平面示意图; (b) 水路纵剖面

1 上水库; 2 进水口; 3 阀门井; 4 低压隧洞; 5 调压井; 6 竖井; 7 高压隧洞; 8 地下厂房; 9 尾水隧洞; 10 下水库

上水库和下水库 建坝壅高马奇林(Marchlyn)湖水位作为上水库,正常蓄水位633 m,死水位600 m。另建坝壅高佩里斯(Peris)湖水位作为下水库,正常蓄水位106 m,死水位92 m。上下水库各有调节库容670万 m^3 ,进行日循环运用。抽水6.5 h,蓄满上水库,可供发电5 h。两湖之间距离3.2 km,利用水头494~541 m。上水库建堆石坝,最大坝高68 m,上游用沥青混凝土护面。下水库筑土石坝,最大坝高35 m。

引水系统和厂房 从上水库以1条直径10.5 m,长1695 m的低压隧洞引水,后接入直径10 m的竖井,深412 m。竖井前设调压井,竖井后接直径9.5 m的高压隧洞,长530 m。洞后分为6条直径3.8 m的压力管道,长400 m,下端90 m用钢板衬砌。

地下主厂房长180 m,宽24 m,高51 m,埋深450 m。安装6台单机容量为300 MW的可逆式抽水蓄能机组。为了防止汽蚀,水轮机的吸出高度达-60 m。尾水洞前段直径4.5 m,共6条,后段合成3条,直径8.5

m,前后两段共长520 m。

机电设备 混流式水泵水轮机的转轮直径3.8 m,转速500 r/min。水轮机工况,额定水头535.8 m时,出力317 MW。水泵工况,额定扬程496.4 m时,抽水流量55.2 m^3/s 。6台最大抽水流量可达390 m^3/s 。利用抽水发电的总效率平均为78%。

发电电动机,单机容量330 MV·A,电压18 kV。通过设在厂房下游变压器洞内的变压器组,升至400 kV,接入400 kV高压配电装置,通过2回400 kV超高压电缆送至地面。

工程量和投资 主要工程量为地下开挖。隧洞和竖井累计总长16 km,连同地下厂房和变压器室等,总计开挖石方达135万 m^3 。

1976年估价为2.28亿美元。1984年建成时造价达6.25亿美元,单位投资347美元/kW。

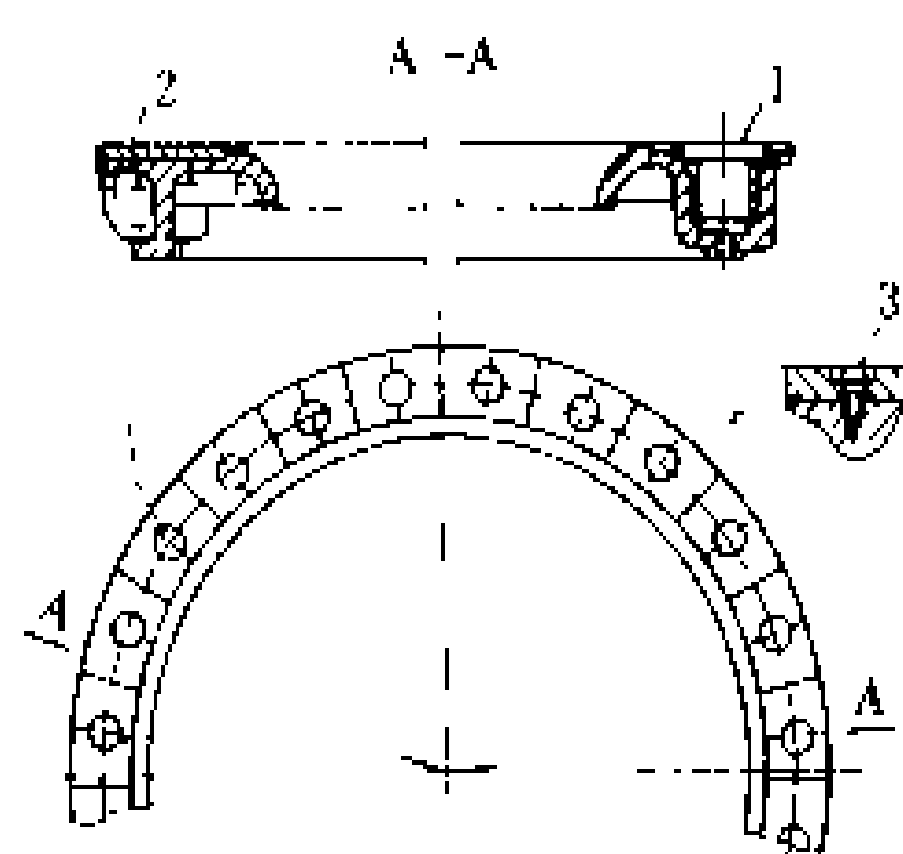
(陆钦侃)

dihuan

底环 (discharge ring; bottom ring) 导水叶下轴颈的支承部件。

底环固定在座环上,它有与导水叶数目相等的轴孔,供装设导水叶下轴承之用,少数高水头水轮机导水叶高度小,也有不设下轴承的。有的混流式水轮机底环和转轮下环止漏环相对的位置上装有固定止漏环。底环和导水叶下端面之间可采用橡胶带密封,高水头水

轮机也可直接采用间隙密封。除整体不锈钢板底环外,大多数底环过流表面都铺设抗磨板,或者直接铺焊抗磨层,一般抗磨板厚度为10~20 mm,铺焊的抗磨层厚度一般为5~10 mm。



混流式水轮机底环

1 导水叶下轴孔; 2 下抗磨板;

3 抗磨板把合方式

底环是一个扁平的环形部件,见图。一般用铸钢铸造,大型底环也可用钢板焊接,受运输条件限制可分为两半或多瓣组合。

轴流式水轮机的底环上设有装拆时悬挂转轮的凹槽,安装后盖板封闭。

(吴次光)

dimo

地貌 (geomorphy) 地球外貌各种形态的总称。它是地球内外动力对地壳作用的产物。内动力作用

使地壳产生隆起和沉降,形成地球表面的基本面貌;外动力起着剥蚀和堆积的作用,缩小地表的起伏和高差。内外动力的相互作用,彼此的消长,也就是地球表面形态发展和演化的过程,海洋与大陆是地球上两个基本的地貌单元。海底地貌由大陆边缘、洋盆及洋中脊组成。大陆边缘包括大陆架、大陆坡、大陆基、岛弧、海沟等地貌单元。陆地地貌按地势和形态,可分为山地、丘陵、高原、平原、盆地等地貌类型。按动力作用性质可分为流水地貌、重力地貌、冰川地貌、风成地貌、喀斯特地貌、黄土地貌、海成地貌及构造地貌等类型。

流水地貌 地表流水的侵蚀、搬运及堆积作用形成的各种地貌。可分为暂时性流水地貌和经常性流水地貌。前者如冲沟、洪积扇、坡积裙等;后者如河谷、河漫滩、阶地、三角洲等。

重力地貌 岸坡在重力及水的作用下形成的滑坡、倒石堆、蠕动体等地貌形态。

冰川地貌 由冰川侵蚀作用及堆积作用形成的各种地貌。如羊背石、冰斗、冰川槽谷、悬谷、侧碛堤、终碛堤等。

风成地貌 在干旱和半干旱地区,由风力作用形成的各种风蚀和风积地貌。如石蘑菇、风蚀穴或风蚀壁龛、风蚀垄槽(雅丹)、沙丘、沙漠等。

喀斯特地貌 水流对碳酸盐类等可溶性岩石以化学溶蚀作用为主形成的各种地貌。如石芽、溶沟、溶斗、落水洞、溶洞、暗河、溶蚀洼地、坡立谷、峰林等。

黄土地貌 黄土内流水侵蚀作用形成的独特地貌。主要有黄土塬、黄土梁、黄土峁、黄土喀斯特、黄土柱等。

海成地貌 潮汐、海流等动力作用形成的地貌。如海蚀穴(洞)、海蚀崖、海滩、泻湖等。

构造地貌 由构造运动起主导作用形成的地貌。如背斜山、向斜谷、单面山、断层崖、断裂谷、断陷盆地等。

地貌学是研究地表形态特征及其发生、发展和分布规律的学科,目前已广泛应用于矿产和地下资源普查、各种工程的勘测与设计以及农田、军事和编制地图等生产实践中。

参考书目

北京大学,南京大学等合编.地貌学.北京:人民教育出版社,1979

(邹小安)

diquwuli kantan

地球物理勘探 (geophysical exploration)

利用仪器测量人工或自然的地球物理场,推断地下地质情况的方法。原理是利用岩石的电性、磁性、弹性

波传播速度、天然放射性及密度等的差异,研究岩层界面、断裂分布、地下水状况、岩体完整性及喀斯特等工程地质及水文地质问题。按其探测环境可分为航空物探、海洋物探、地下物探及地面物探。以其工作方法又分为电法、地震法、磁法、重力、放射性及弹性波测试等。中国水电工程地质勘察中,常用的有电法、地震法、弹性波测试及综合测井等,重力勘探在研究使用中。

电法勘探 以量测电场变化研究地质问题的物探方法。按电场建立的方法、场源性质及测量方法的不同,可分直流电场中的电阻率法、激发极化法、充电法及自然电场法;交流电场中的大地电场法、低频电阻率、电磁频率测深、变频及无线电波透视法等。上述物探方法可探查基岩和地下水埋藏深度、风化岩及覆盖层厚度、断裂、喀斯特的分布等。直流电法在工程地质勘察中应用较广,尤其是寻找地下水、研究水文地质条件效果较好。交流电法目前使用较少,有些项目尚在探索中。

地震勘探 根据人工激发的弹性波在岩层中传播的特性研究地质情况的一种方法。按所接收地震波的类型,分为反射波法和折射波法,可用于探查覆盖层厚度、岩层界线、隐伏断裂的分布等。此法的精度和效率比电法高。就反射法与折射法相比,二者各有所长。当两种介质的波阻抗(波速与密度之积)差别明显,岩层速度倒转(即上部岩层的波速高于下部),探测的对象埋藏较深,而施测场地又狭窄时,用反射法的效果较好。

弹性波测试 利用人工或仪器激发的波,在岩石内传播的特性,研究岩体的完整性、划分风化带、确定爆破松动圈、检查地基处理效果等的物探方法。弹性波测试按其工作及探测仪器,可分为地震波、声波等测试方法。目前使用的声波检测仪,能量一般都比较小,探测的试段不能太长,但分辨力很高,可研究岩体小范围的差异,如测松动圈多用此种方法。地震波探测的试段长度,由几米到几十米均可,用它测较大范围岩体的弹性参数是较快而经济的方法。

重力勘探 利用岩体间的重力差引起的重力场异常,分析研究地质构造、喀斯特暗河及洞穴等分布的物探方法。中国水电系统已应用国外高精度的微伽重力仪,研究探查喀斯特和断层构造等地质问题。

测井 常用的有电测井,声波、放射性、温度测井,钻孔电视测井径等。根据井孔内岩土的物理参数,划分岩层(包括软弱的夹层),测定断裂破碎带位置,含水层厚度,地下水流速、流向及矿化度等。在同一孔内可用多种方法探测,取得综合测井资料,相互验证,以便更可靠地确定某些工程地质问题。

物探是一种技术先进、设备轻便、工作效率高、费

di 地

用较低的勘探方法。但它要求有可利用的物性差异和必须的施测环境,因此,要根据地形、地质及物探的应用条件,合理地选择探测仪器和方法。另外,物探资料有多解性,要转换成地质上可用的成果,还需要有分析研究的过程。一般,由物探与地质专业共同解释,并有少量勘探资料配合能取得较好的地质效果。

(崔诗礼)

diqu dianyuan ji shuidian fazhan guihua

地区电源及水电发展规划 (regional electric generation and hydropower development planning)

根据地区国民经济发展要求制定电源合理组成及水电站建设时序的研究设计工作。规划的主要依据是地区用电负荷规模、地区各河川的河流规划、一次能源规划。规划的主要内容是:根据电源建设条件,电力电量平衡分析和经济比较的结果,结合考虑社会因素,选出电力系统的电源构成和电源建设时序。规划一般统一研究安排各类电源以充分发挥各自特点互相取长补短,使整体效益最好。电源规划分长期和中期规划两种。中期规划一般研究今后 10 年到 20 年的电源扩展方案,要求较高的分析计算精度。长期规划的规划期较长,有长达 50 年的,属战略性研究,如确定水火电站大体比重、电源在地区内的大体分布等。

规划原则 ①与地区国民经济发展计划相适应。②河流规划选定的梯级组成及各级电站的开发时序是地区电源规划的基础。③以电力系统整体经济最优为准则选择方案,但有时以水电站的水库淹没损失或火电站对环境污染影响不超过某一限度为约束条件选定方案。④地区一次能源平衡是电源规划的前提条件,有时一次能源和电源统一规划选定。

规划内容与方法 随着电力工业技术发展和管理体制的改革,使内容和方法不断发展。中国根据自己国情也在改进提高,现在主要有以下几方面研究内容。

(1)调查地区国民经济和电力系统现状。如用电负荷规模和特性、电源构成及其运行特性等。

(2)调查、预测地区国民经济发展和用电负荷发展的规模和特性。

(3)研究可开发水电站、火电厂、抽水蓄能电站、核电站等的建设条件,包括建设投资、施工期、可能投产的最早年份等。对水电站还要研究水资源综合利用对电站运行方式的约束。对火电站还要研究其对环境的污染影响,减轻污染的措施及费用。

(4)进行水电站群的径流调节计算和水能计算。径流调节计算一般考虑在输电能力、水资源综合利用等约束条件下,依据电站群整体效益最大的原则安排各水库运行方式(见水库群补偿径流调节)。

(5)系统电力电量平衡计算。以全系统运行费用(其中包括火、核电厂的燃料费)最小的原则安排火、核电厂的电力、电量分配。据此确定各新建电厂提供电力、电量和调峰能力的作用和效益。

(6)国民经济评价分析。以计及资金时间价值的全系统费用最小原则选择方案。并论证选定方案的经济合理性(见水电站经济评价)。

(7)财务评价分析。分析研究选定方案的资金筹措并论证其可行性(见水电站财务评价)。

(8)基础条件变化的敏感性分析。一般分析负荷规模、新建电源所需投资和工期以及新建火、核电厂的燃料来源及其价格等因素变化对经济评价和财务评价的影响。

(9)综合比较。在一般条件下可据国民经济评价分析选择各新建电源的投产时序。但有时因一些不能用货币量确切计算的因素,如水电站水库淹没损失和火电厂对环境污染影响等,要综合比较决策。

以上 9 项工作中,前 3 项是规划的基础,一般独立分析确定;后 6 项分析计算互相影响,宜统一进行优化或经迭代逐步逼近优化,但因受计算技术水平限制,各国采用的方法不尽相同。中国在 70 年代以前常设想几个方案,分 6 步孤立分析确定,规划质量难免受影响。80 年代以后,中国部分设计科研单位编制了电源规划数学模型,实现统一整体优化,提高规划质量。现已应用的模型有:多区域发电系统优化规划模型(Generation of Electric System Planning, GESP)和跨区电力长期优化规划模型(Inter-Regional Electric Long-term Planning, IRELP)等。

在北美、欧洲的一些工业发达国家普遍用数学模型进行电源规划,如国际原子能机构用的 WASP 模型(Wien Automatic System Planning Package),美国电力科学研究院编制的 EGEAS 模型(Electric Generation Expansive Analysis System)等。在规划中研究的内容也比较全面,如:①越来越严格的环境保护法规对电厂建设提出很高要求,电源规划工作中包括有较全面、详细的环境影响计算。②一般用失供电力负荷率(Loss of Load Probability, LOLP)作为供电可靠性指标,电源规划中包括选择经济合理的 LOLP 指标,比中国采用的备用容量率准则(电源装机容量必须保持是最大负荷的一定倍比关系,中国一般采用为 1.2~1.25)更科学合理。③有些工业发达国家(如法国)的电力系统管理正由仅管理供电侧发展到同时管理用电侧。即通过电价调整和采取政策手段促使用电户节约用电、合理用电。所以电源规划工作内容也随之扩大,包括研究制定电价和提出政策,据此预测用电负荷规模和特性,再据负荷提出合理的电源构成和投产

时序。

(欧阳华)

dixia changfang kaiwa

地下厂房开挖 (underground powerhouse excavation)

开挖位于地下岩层厂房的施工过程。地下厂房开挖部位包括主、副厂房及配套的井、洞、室,如上部的电缆井、通风洞,中部的交通运输洞,下部的高压管道、尾水洞,以及变压器室、阀室、通风机房、中央控制室、事故排水洞、电梯井等地下建筑物。这些地下建筑物往往埋藏较深,断面跨度较大,交叉口多,开挖量集中,施工中通风排水困难,施工复杂而要求工程质量高,常是控制水电站施工总进度的关键。

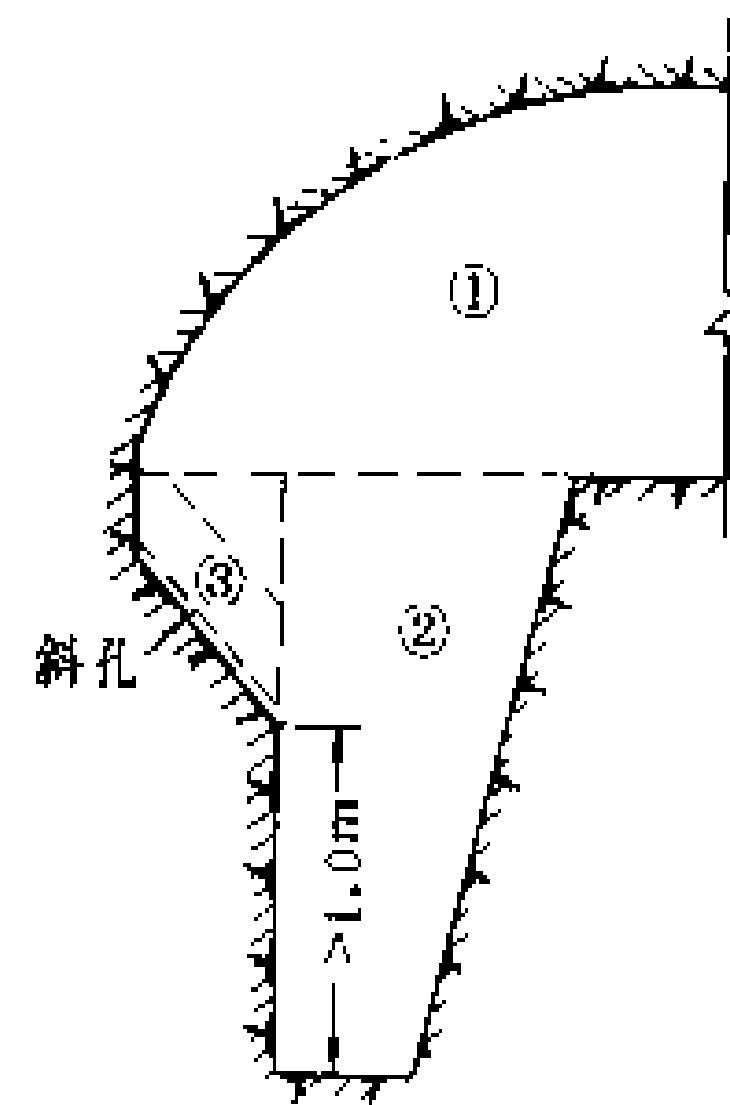
地下厂房通常采用钻孔爆破法开挖。主厂房一般划分成若干层进行开挖。分层高度根据围岩地质条件、开挖后围岩应力重分布及其组合影响、稳定围岩措施、厂房形状及其断面尺寸、各种井洞的相对位置、出碴通道、施工设备能力和施工技术水平等因素选定。当围岩稳定时,主厂房开挖一般分做三大层,即顶拱层(上部)、发电机以上层(中部)及发电机以下层(下部)。施工时,常先挖通电缆井、通风洞、交通运输洞、尾水洞等永久通道,以改善厂房开挖时的通风及运输条件,然后围绕机组发电要求安排上、中、下层开挖进度。

(1)顶拱层开挖。一般利用上层井洞作为出碴通道最先开挖,用的最多的是永久通风洞。无永久通道可资利用或虽有永久通道但工期推迟或干扰较大时,也常选择有利地形设置施工专用的支洞、斜井或竖井,使能早日进入顶拱层。开挖方法通常有先拱后墙、先墙后拱和肋墙法等多种。①先拱后墙法。在围岩基本稳定而跨度不大的地下厂房顶拱层,一般都用隧洞开挖方法掘进。顶拱层开挖后及时衬砌或锚喷支护,然后再开挖中、下层。这种方法工序简单、干扰小,进度快。②先墙后拱法。利用永久通道先分层开挖厂房两侧边墙,分层多少根据边墙与永久通道交叉位置和围岩特性决定,边墙开挖后随即分层衬砌或锚喷支护,然后进入顶拱层开挖并及时衬砌。此法施工比较安全,适用于围岩稳定性较差和拱座承载能力较低的地下厂房开挖。③肋墙法(又称肋拱法)。先挖两侧导洞,在导洞中间隔一定距离开挖一条与导洞垂直的边墙或顶拱肋条,肋条宽度与间隔距离根据围岩地质条件确定,必要时可先加固围岩,开挖后进行衬砌或锚喷支护,形成边墙或顶拱的混凝土肋,然后开挖其余顶拱并进行初砌,中间岩体在衬砌后的拱墙保护下分层开挖。此法适用于围岩不稳定而跨度较大的地下厂房开挖。

拱座是地下厂房顶拱结构的支承部位,开挖时要求成型好,对围岩的爆破影响小,因此常将拱座留在顶

拱层开挖的最后施工。通常拱脚线的最低点距下一层的开挖面大于1 m,沿垂直规格线采用预裂爆破或光面爆破,沿斜面打斜孔

分块爆破,见图。若地下厂房留置岩台架设吊车梁时,吊车梁座开挖也用预裂爆破或光面爆破控制。若岩台处有不利构造面,须先将不利构造面锚固后再行开挖,以免岩台顺构造面破坏。岩台吊车梁可在顶拱开挖支护后浇筑。岩台吊车梁有利于提前安设桥式起重机等为中、下层施工服务。



拱座开挖图

①、②、③为开挖顺序

(2)中、下层开挖。一般在顶拱开挖支护后,再进行中、下层开挖,其开挖方法通常有梯段预裂爆破法、台阶法、辐射孔法及预留中层法。①梯段预裂爆破法。用潜孔钻或车钻自出碴通道向厂房全断面推进,分层分批深孔梯段爆破,规格线处采用预裂爆破,适用于围岩稳定性好的地下厂房中、下层开挖。②台阶法。全断面自上而下分台阶浅孔爆破,台阶大小和孔深视围岩地质条件和设备性能决定,随台阶开挖可对边墙及时加固,适用于围岩稳定性差的地下厂房中、下层开挖。③辐射孔法。利用各层出碴通道开挖导洞,在导洞内钻辐射孔,分层、分段爆破推进,适用于机械化程度较低的中型地下厂房中、下层开挖。④预留中层法。在顶拱层开挖同时开挖下层底部导洞,待顶拱层衬砌或支护和底部导洞扩挖后,最后开挖留下的中层岩体衬砌边墙,这种方法需增加导洞的开挖工作量,顶部和底部都要有出碴通道,但可加快开挖进度,由于中层岩体已不受夹制,比较容易开挖,适用于围岩稳定较好,断面跨度较小的地下厂房中、下层开挖。

除上述方法外,还有在厂房当中部位先打竖直导井,导井直径一般为1~2 m。然后自上而下采用浅孔爆破,石碴通过竖井落入底部出碴通道运出的施工方法。导井的数量按厂房面积和开挖强度选定。厂房中部开挖常通过交通洞出碴,下部常通过尾水隧洞或底部施工支洞出碴。

在地下厂房高边墙与各永久通道的交叉口,往往是围岩最不稳定之处,对地质条件差的工程一般都要在地下厂房中、下层开挖前挖完,并在靠近高边墙处做好支护锁口。锁口常用钢筋混凝土衬砌,长度视围岩稳定条件决定,通常不小于6 m。相邻两洞室间的岩墙或岩柱,以及高边墙的支护,除随着自上而下的开挖进



展,边开挖边设置锚杆或锚喷加固外,对局部不稳定围岩也要及时加固。加固措施有深孔锚栓、预应力锚索、对穿预应力锚索、抗剪钢筋混凝土塞等。

(王守道)

dixia gongcheng anquan yu fanghu

地下工程施工安全与防护 (safety and protection of underground works) 为保护施工人员的健康与安全,对地下施工环境的要求和对有害因素的防护措施。主要是对有害气体、粉尘、噪声和照明等的要求。

有害气体 主要由开挖爆破时的炸药分解不全和内燃机械运转时的燃烧不全所产生。在含瓦斯地段或含硫化物矿层,亦会存在天然瓦斯(如沼气)或含硫有害气体。根据中国 SD267-88《水利水电建筑安装安全技术工作规程》的规定,在地下工程施工时每人每分钟供给 3 m³ 新鲜空气。中国在 SDJ212-83《水工建筑物地下开挖工程施工技术规范》中规定开挖爆破后工作面有害气体要在 20 min 内排出或冲淡至下表容许浓度。为排除有害气体,补给新鲜空气,在地下工程施工中通常都用自然通风或机械通风方式净化空气。

气 体 名 称	容许气体体积 浓度(ppm)	容许气体重量 浓度(mg/m ³)
二氧化碳 CO ₂	5000	
一氧化碳 CO	24	30
二氧化氮 NO ₂	2.5	5
二氧化硫 SO ₂	5.2	15
硫化氢 H ₂ S	6.6	10

注:ppm 为百万分率(parts per million)。

(1) 自然通风。依靠洞内外空气对流的通风。①在岩层不产生有害气体的短小隧洞,可借洞口进风净化空气。②隧洞断面较大采用分部开挖时,可先贯通导洞、导井形成对流通风。③长隧洞或地下厂房开挖时,可利用平行支洞、永久井洞等通道使风流随井洞循环。自然通风送风容易,供风能力大,成本低。

(2) 机械通风。有压入式、吸出式和混合式 3 种。①压入式是用风机将新鲜空气通过风管压至工作面,将有害气体冲淡净化,对爆破影响较小,但污浊风流自隧洞全断面排出,影响洞内其他工种作业,散烟时间随洞长而增加。②吸出式是风机将工作面的污浊风流沿风管吸出,自隧洞全断面补给新鲜空气,排烟速度快,但风管末端距工作面相对较近,易受爆破损坏。③混合式是用一台风机压入新鲜空气,另一台风机将工作面污浊风流沿风管吸出,通风能力强,卫生条件好,但要

两套以上设备,运转费用较高。

粉尘 主要来源有凿岩、爆破、出碴或二次破碎等施工作业产生的原生粉尘,和部分已沉落而又受其他因素扰动(如风流、爆破时的空气冲击波、车辆运行、人员活动等)再次飞扬的粉尘。常见于地下工程施工中的粉尘,大多为粒径 0.25~10 μm 的能呈等速度沉降的尘粒。防尘的主要对象为大于 5 μm 的呼吸性粉尘,而由凿岩时产生的这种粉尘约占 85%,因此,主要的防尘措施是针对凿岩作业的。通常地下工程开挖都用湿式凿岩即在钻孔时从凿岩机喷水降尘,并配合其他防尘措施,如:爆破后喷雾降低悬浮在空气中的粉尘含量;在距工作面附近设置带孔水管通水构成水幕;用压力水冲洗岩壁粉尘;装碴出碴时水淋石碴,以及人员用防尘口罩、压风呼吸器、防尘安全帽等劳保用品等。

除地下工程开挖过程中所产生的粉尘外,在喷混凝土作业中的水泥粉尘也是工作面尘源之一。这些尘源的尘粒较难沉降,一般采用改进喷射工艺、控制工作风压、提高操作技术等措施解决,有条件时可设旋流除尘器。

噪声 由凿岩、出碴、通风等施工机械运行、振动、摩擦、撞击和气流扰动产生的噪声,也是工作面的重要污染源,其危害足以降低工作效率,损伤听觉,诱发疾病。一般地下工程施工工作面的噪声要求不大于 85 dB,当超过 90 dB 时要采取防护或消音措施,否则要减少接触噪声时间。

照明 地下工程施工通常用 36 V 或 24 V 电压照明或 220 V 电压投光灯照明。长隧洞在成洞段常用高压绝缘电缆引入 10~6 kV 电压至适当地点设变电站使用。洞内供电线路要求绝缘性能良好,照明线与动力线分别架设。

地下工程施工的其他安全与防护设施有:洞口附近设急救站;洞内外适当地点设消防设施;洞外附近有浴室、烘干室和理疗室等卫生设施;洞内外有可靠通信设施等。

(王守道)

dixia gongcheng shigong zhihu

地下工程施工支护 (temporary support for underground works) 在地下工程施工中为维护围岩稳定,保证施工安全的临时措施。地下工程施工支护可以在围岩出现有害的松弛变形之前迅速提供一定抗力,改善围岩受力条件,控制开挖后的围岩变形增长,支承落石,保护施工安全。施工支护的结构,通常要求有足够强度和稳定性,能适时控制变形和承载变形后所产生的载荷,与围岩接触良好并允许在支护后

围岩能产生有限变形以利用其自身承载能力,结构简单,造价低廉,施工方便,所占空间较小。

地下工程施工的支护类型,根据地质条件、洞室结构、断面尺寸、开挖方法、围岩暴露时间等因素决定,一般分锚喷支护和构架支撑两类。

锚喷支护 有锚杆支护、喷混凝土支护、锚杆喷混凝土与金属网联合支护及预应力锚索深孔锚固支护等。(1)锚杆支护。单一锚杆支护施工方便,能与围岩紧密接触及时提供抗力。系统锚杆一般布置成正方形或梅花形,锚入深度较浅,间排距约为深度之半且不大于1.5m。局部锚杆深度要超过围岩松弛区。(2)喷混凝土支护。能对不稳定围岩提供支护抗力,封闭围岩表面和充填裂隙,阻隔涌水。(3)锚喷联合支护。锚杆深入稳定岩层,围岩松弛范围较大或高边墙不稳定洞室常采用长短锚杆相结合表面喷混凝土支护。(4)预应力锚索支护。索体用钻孔穿过围岩滑动面或不稳定区进行预张拉,并维持所需载荷对岩体施加压力,适用于大跨度洞室顶拱、高边墙、岩柱、岩墙、洞脸及高边坡等不稳定岩体。(见锚喷)

构架支撑 要求支撑材料经济,易于拆装,联接牢固,安全可靠。按结构型式分拱形、梯形、扇形、多边形拱形和棚架等几种。按制作材料分钢、预制混凝土和木3类。(1)钢支撑。由立柱、顶梁、垫板、拉杆、连接件及楔块组成,适用于围岩稳定性差的中、小型断面地下工程。在地压力不稳定和围岩变形量大的软弱岩层或断层破碎带,也有用可缩性金属支架的。钢支撑承载力大,坚固耐久,体积小,构件轻,但成本较高。(2)预制混凝土支撑。适用于中、小型断面地下工程。其优点是成本低,但构件笨重,运输、安装困难。(3)木支撑。适用于中、小型断面和进行分部开挖的地下工程。其优点是重量轻,加工、安装方便,出现险情前有征候预示且易抢工,但木材强度较低。(4)棚架。各类支撑材料均可制作,常用在地下工程进出口及井下导洞出碴处,一般顶部铺设垫板和柔性材料或石碴,梁的端部除临空面外均与岩壁顶紧。

所有地下工程施工的支撑柱基均安置在平整岩面或加设的垫梁、垫板上,每排支撑各构件保持同一平面且与洞轴垂直,各排间相互连接成整体,支撑与围岩之间用背板、楔等背材塞紧,并在施工过程经常检查支撑受力情况。使用完毕及时拆除,预计支撑受力后难以拆除时,要将支撑设在建筑物设计断面以外或用非有机质材料制成的支撑。

(王守道)

di xia gong cheng wei yan

地下工程围岩 (surrounding rock of un-

derground engineering) 作为地下开挖工程环境的岩体。岩体在开挖地下洞室以前处于天然地应力的平衡状态,是稳定的。开挖地下洞室以后,天然应力状态受到扰动,应力重新分布,而在洞室周围一定范围内形成局部应力集中带。由于地下工程所处岩体的地质环境,岩石力学性质和应力集中程度的不同,可能在临空面处形成新的平衡而趋于稳定,也可能超过极限状态而趋于失稳。实际工程中,常采用工程类比的围岩分类法,或基于各种假定的解析或数值分析方法,判别围岩的稳定程度,而确定衬砌和支护的类型及其布置。

围岩的工程分类 根据围岩的地质条件、结构面状况和岩石(体)力学性质指标对岩体进行分类。目前,国内外提出了多种分类系统,如N. K. 巴顿(N. K. Barton)等人的NGI分类等。

围岩应力状态 地下工程开挖后,天然地应力状态受到扰动,围岩应力重新分布,并发生应力集中现象。洞室孔口部位的法向应力下降,在洞室边界上为零。有的部位环向压应力增加,而有的部位则下降甚至还会出现拉应力。它们在洞室边界上变化最大,向岩体深部逐渐转化为天然应力状态。

围岩应力集中程度 主要取决于岩体开挖前的天然地应力状态、地下洞室的几何形状及围岩的力学性状。

(1)地应力。岩体天然地应力状态十分复杂,地应力场是重力场和构造应力场的耦合。地应力不仅与深度有关,而且受地质环境和地形条件的影响,目前还不能通过理论分析进行计算,只能通过试验测定。在地下工程设计中,取洞轴线与最大主应力方向一致或小角度相交,围岩的应力集中就较缓和,因此根据地应力的最大主应力方向选择洞室走向十分重要。

(2)洞室形状。对于带有尖锐轮廓的洞室,局部应力集中十分严重,应该予以避免。当地下洞室的方向确定之后,应根据与洞轴线垂直平面上的地应力分量选择合理的断面形状。

(3)围岩的力学性状。地下工程所处岩体的地质背景、岩石力学性质和应力集中程度不同,围岩可能出现不同的力学性状。在均匀岩体中,围岩可能处于弹性状态,也可能进入塑性状态、粘弹塑性状态,甚至产生脆性破坏。在脆性破坏时,轻微的表现岩石剥离,严重的出现喷射现象。在层状岩体及松散破碎岩体中,围岩可能失去平衡而沿岩体软弱结构面滑动或脱落,甚至发生坍方事故。

围岩加固设计 在地下洞室开挖及运行过程中,要防止围岩失稳,保持其长期稳定性,有时需要对围岩进行加固处理。加固方式有混凝土衬砌、钢板衬砌、锚喷及各种支护、灌浆等。早期的地下工程重视衬砌和支

di 地

护建设,将岩体仅仅作作为衬砌和支护承受的载荷源,并假定岩体为松散介质建立了山岩压力理论。近代地下工程设计理论认为围岩既是载荷源,又是一种承载结构,应充分发挥岩石本身的强度,只在岩体本身不能维持稳定时,才进行加固处理。衬砌和支护的设计中也考虑与岩体的联合作用。围岩应力与稳定分析主要依靠有限元、边界元、离散元及块体理论等数值分析方法,在特殊条件下也可以用解析法求解。

水工隧洞要承受内水压力作用,同时有平整度要求,多数情况下要采用混凝土衬砌,有的甚至要进行钢板衬砌。这时围岩的应力状态是开挖后的应力重分布与承受内水压力后的组合状态,围岩的变形性能决定了它分担内水压力的比例。设计中要考虑围岩与衬砌的共同作用。对于圆形隧洞,基于弹性理论中的厚壁圆筒公式,根据岩体与衬砌的变形连续条件,建立了围岩和衬砌的应力计算理论。对于任意形状的压力隧洞,基于弹性地基梁的地基反力系数假定,用结构力学方法计算衬砌的内力。

(陆家佑)

dixia jianzhuwu yuanying guance

地下建筑物原型观测 (prototype observation for underground structure) 通过埋设在地下建筑物围岩和结构物中的各种仪器,量测其动静态应力、应变、位移、压力和温度等参量的时间与空间变化的技术。由于地下建筑物的设计理论尚不完善,加之岩体性质、地质条件等因素事先很难完全了解,使得地下建筑物的设计施工越来越离不开原型观测。原型观测的目的也不仅是为了施工期和运行期的安全监测,而且也要依据原型观测资料的反馈分析,进一步修改设计和改进施工方法,使之更加符合实际情况,并据以提高施工技术和设计理论。地下建筑物原型观测一般可分为施工期观测和运行期观测两大类,选用性能稳定、简单可靠的仪器设备进行变形和位移、应力和应变、渗透压力等项目的观测。地下建筑物原型观测始于20世纪30年代,中国始于60年代初,目前已在水利水电工程的地下洞室中较普遍地开展。

施工期观测 亦称临时观测,其作用是:①安全监测,较早地提供围岩失稳的警报,以便及时采取补救措施。②提供第一性资料,减少在设计假定中的未确定因素,取得反馈信息作反分析用,校核原设计,并在必要时修改原设计。③保证施工技术措施能符合实际情况,既安全、又经济,总之,是利用施工期所提供的信息,反馈到设计和施工中去。60年代发展起来的隧洞施工的新奥法,施工期观测就是重要组成部分之一。

施工期观测的项目,一般有位移、应力(应变)、渗

压和温度等项,有时观测项目随施工进度而变更。

(1) 位移观测中常用的仪器有收敛计、多点位移计(伸长计)、钻孔倾斜仪、挠度计、测缝计和水准测量(如正倒锤)。

(2) 应力观测的常用仪器为锚杆测力计、钢筋计和应变计。

(3) 渗透压力观测的仪器有渗压计、压力计、测压管等。

(4) 温度观测仪器为温度计。

对地下建筑物原型观测仪器的要求,原则上应性能稳定、使用简单可靠、节省人力,且尽可能地自动化、遥测化。

运行期观测 亦称长期观测,其作用是:通过一些主要建筑部位的典型断面埋设的仪器,对地下建筑物的岩体和衬砌进行长期观测,以了解建筑物在运行过程中受力状态及周围环境条件(温度、地下水)的变化,以保证地下建筑物的安全运行,或在必要时采取补强措施。此类观测资料还可作为反分析的依据,以进一步检验原设计的正确性,为今后改进地下建筑物设计理论积累数据,供其他工程设计借鉴。

运行期观测的项目和所用仪器,基本上和施工期观测相同,只是在仪器性能的稳定性上要求更高些、应确保长期正常使用。

通常工程上对施工期观测与运行期观测的项目和仪器进行统一规划设计,使施工期埋设的仪器也留作运行期观测使用。

观测间隔时间 施工期观测的历时较短,一般在早期每隔1~2h观测一次,待观测值趋于稳定后,改为每日或隔日观测一次,直至施工结束;运行期观测的历时较长,通常初期每日或隔日观测一次,随观测值变化减缓,逐步改为每周、每旬观测一次,最后可每月观测一次。遇有异常情况时应随时加密观测间隔。在观测中捕捉开挖过程中的早期变形是极为重要的,因此要及时埋设仪器,及时观测。

资料整理 首先,要正确确定初始值,然后,按率定曲线或计算公式求出不同时间的应力或应变(变形),并及时绘出它们的历时曲线,以供指导施工和运行管理应用。影响原型观测值的主要因素,除了观测仪器本身的灵敏度外,还有埋设仪器的时间,埋设技术,施工干扰、爆破振动、地下水和地质条件等。在整理资料时应予注意。

(叶金汉)

dixia shi changfang

地下式厂房 (underground hydropower house) 位于地表以下岩体中的水电站厂房。它

的特点主要有：①厂房位置不受河谷宽窄限制，可以避免与水电枢纽的其他建筑物布置互相干扰。②地下厂房可以全年施工，受洪水和恶劣气候影响小，同水电枢纽其他建筑物施工亦无干扰。③可以充分利用岩体作用，简化厂房结构。④地下洞室通常比较潮湿，缺乏自然采光条件，噪声反应亦较明显，因此要采取较多的改善地下厂房运行环境的措施。

地下厂房按埋置方式有以下3种。

(1) 全地下式厂房(图1)。主厂房位于地下距离地表一定深度的洞室中，发电引出线、对外交通、通风等依靠隧洞、竖井或斜井与外部联系，与发电联系比较密切的副厂房如中央控制室、继电保护装置、低压配电装置、通信设施等通常也都布置于地下，主变压器及开关站也可设于地下。全地下式是地下厂房中最常见的类型，也称地下式厂房。

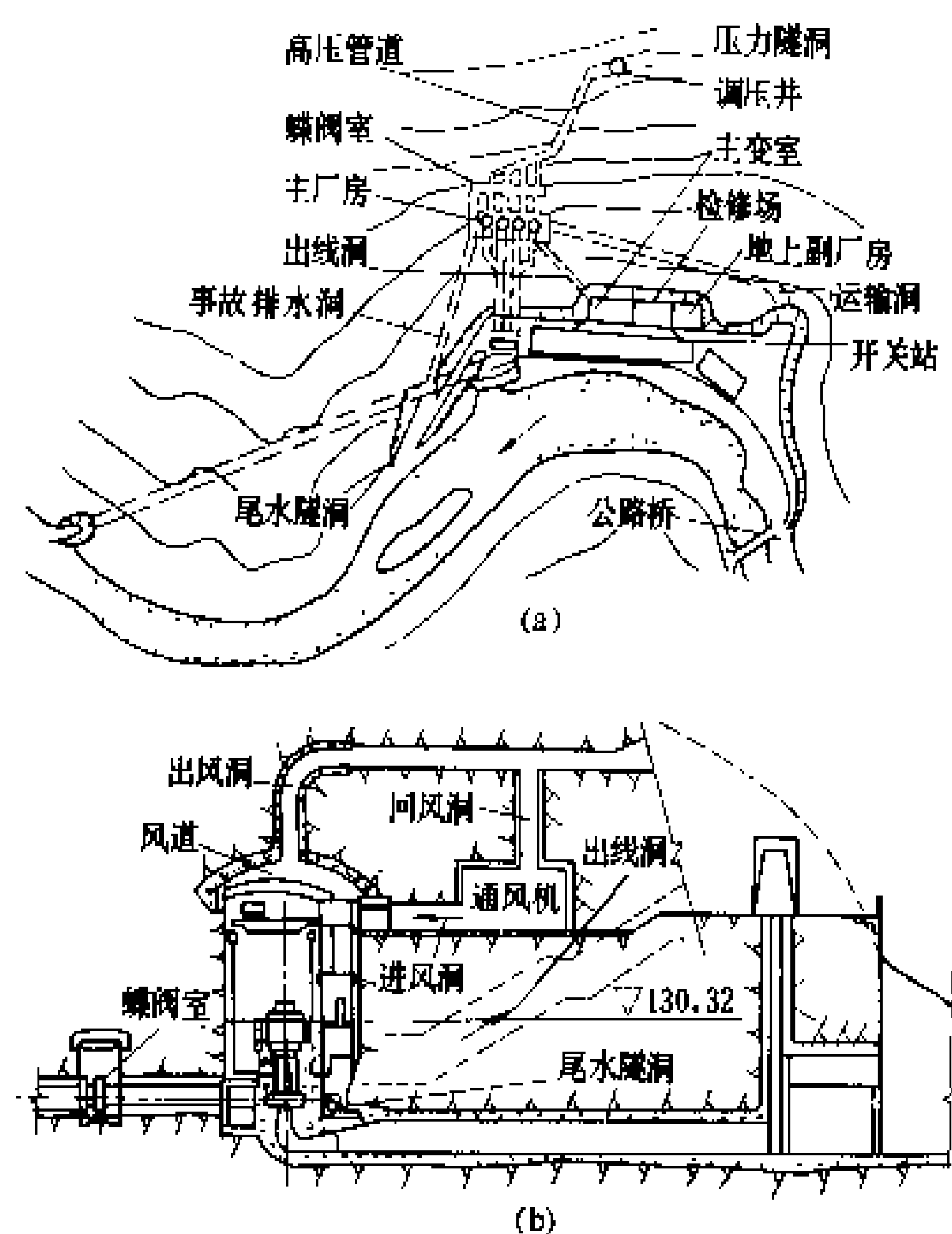


图1 全地下式厂房示意图

(a) 厂区平面；(b) 地下厂房横剖面

(2) 半地下式厂房(图2)。主厂房或主厂房的下部结构布置于山体明挖的深槽(井)内，相应的上部结构为掩埋式或敞露式。适用埋置较浅的地下厂房。

(3) 窑洞式厂房(图3)。主厂房置于岸边山体窑洞内。在坝后河床宽度狭窄，不够布置水电站所有机组，而地质条件允许开挖大跨度洞室的情况下，可采用此种厂房，例如中国刘家峡水电站厂房。

地下厂房布置 主厂房安装有水轮发电机组及附属设备。水轮机前多设有事故和检修用闸阀，有的设主厂房内，有的设主厂房外单独的阀室内。一机一管

引水且引水及压力管道较短的水电站，可用装置在进水口、压力前池或调压室中的快速闸门代替水轮机前的闸阀。尾水管出口连接尾水隧洞，当单机泄流量不大

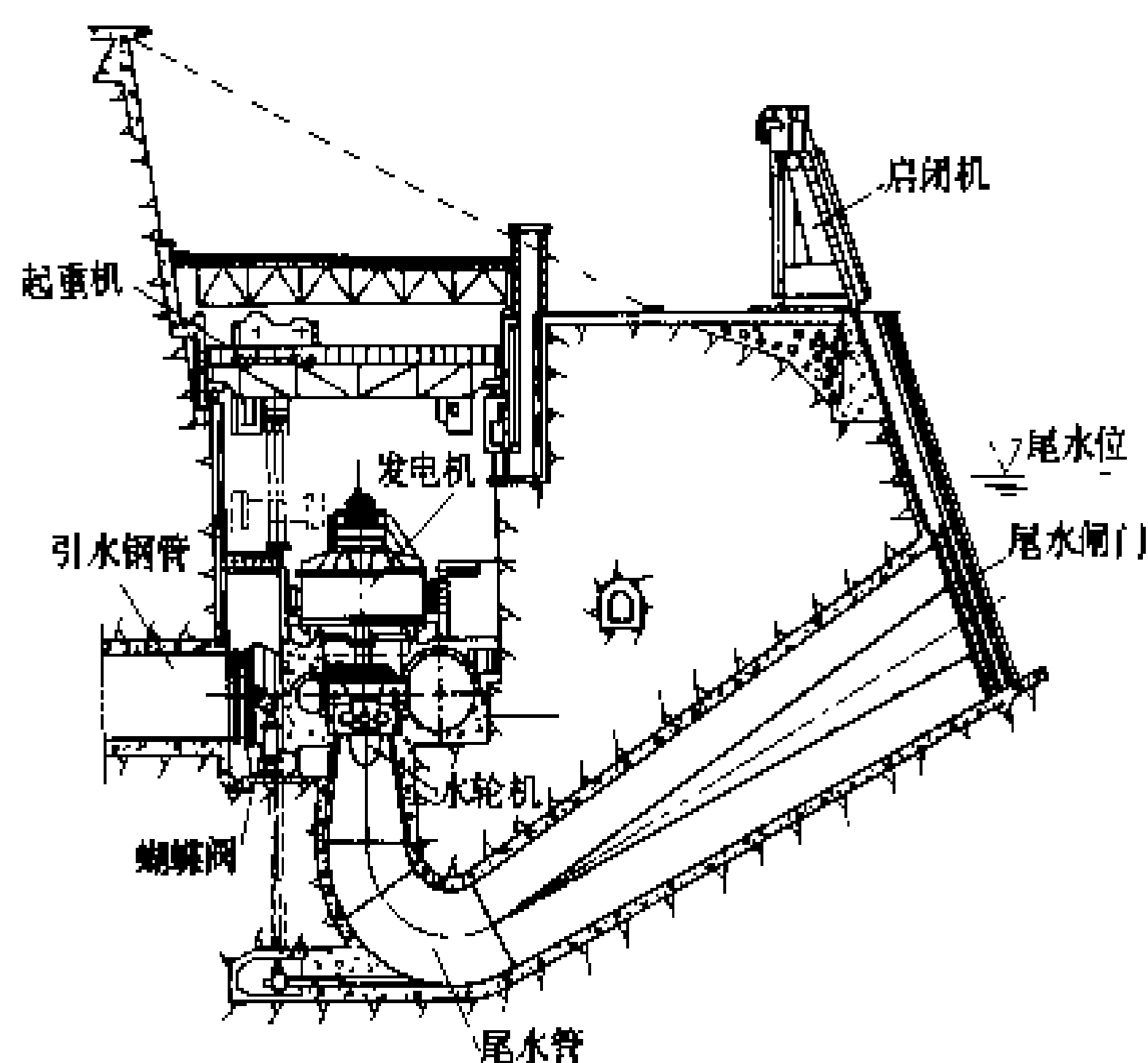


图2 半地下厂房横剖面

或尾水隧洞较长时可多台机组共用一条尾水隧洞，单机泄流量较大或尾水隧洞短时常采用一机一洞的方式。尾水隧洞泄水分为无压和有压两种，无压尾水隧洞需要的过水断面大，有压尾水隧洞需要的过水断面较小但有时需在其与尾水管连接处增设尾水调压室，以满足机组运行调节节保证的要求。通常在每一机组的尾水管上设有尾水闸门井及启闭机室，但若尾水隧洞较短可由隧洞出口处闸门代替。主变压器与开关站可布置于地面，也可布置于地下洞室内，有多种组合。埋深比较大的地下厂房趋向于把主变压器安装在邻近地下主厂房的洞室内，或主厂房的端部、下游侧。这样布置，低压侧母线短，结线方便，主变压器检修可利用安装间进行，高压侧出线采用高压电缆引出，需要的出线洞断面尺寸不大，高压电缆引至洞口后转换为架空裸线向外输电。若厂区地形陡峭、高差大，往往把开关站布置于地下，大型地下厂房采用六氟化硫气体绝缘开关装置，减少了占地面积，使开关站布置更加紧凑。例如有的地下厂房把开关站布置在平行于主厂房的下游与主变压器同一个洞室中，洞室分上下两层，上层为开关站，下层为主变压器室。副厂房多设在主厂房左、右端，分多层布置。高水头水电站中也有把副厂房布置在主厂房一侧的。把副厂房的全部或部分布置于洞外地面的例子也是常

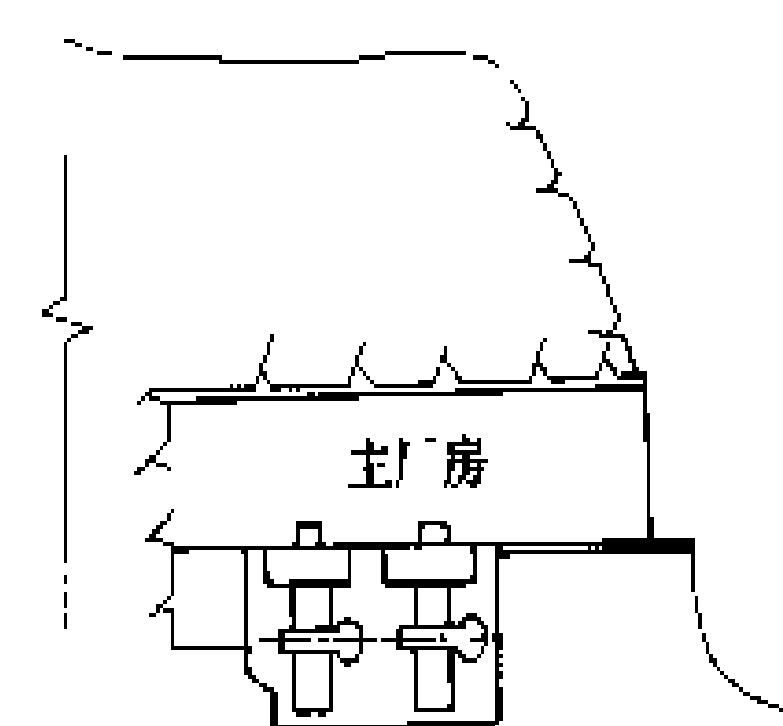


图3 窑洞式地下厂房示意图

di 地

见的。

运行条件 地下厂房各部位对环境的温度、湿度有一定要求,一般都设有防潮和通风设施。对洞室围岩地下水较丰富,岩体透水性强的工程常需进行灌浆以减少地下水渗漏,并按有关标准设计和配备排水、防潮、防火防爆、防噪声、防振、通风、照明以及上下水卫生设施等和安全通道。

地下厂房结构 由主洞室和附属洞室组成。洞室埋深与方位主要由地形及地质条件所决定,一般要求主洞室的纵轴线方向尽量与岩体的主要构造面(断层、破碎带、节理、裂隙、层面)呈较大的夹角,对于高地应力区要兼顾地应力方向,尽量使主厂房轴线与最大地应力方向交角较小,以利围岩稳定。洞室之间岩墙(柱)要保留一定厚度以维持有足够的支承能力。洞室断面形状和高跨比对围岩稳定性也有一定的影响。岩体完整坚硬,地应力不大时,一般采用直墙拱形断面;岩体破碎强度低,水平向地应力较大时,一般采用马蹄形或卵形断面。洞室开挖通常采用钻孔爆破,开挖过程要根据工程地质情况采取及时支护,防止因塌方面妨碍工程进展。为了保证地下厂房在长期使用中的安全,还需对洞室进行永久性加固支护,永久性加固支护可采用喷锚支护或钢筋混凝土衬砌。永久性加固支护与施工安全支护视地质条件和工程进度要求,有的分期完成,有的合并为一次完成。早期兴建的地下厂房永久性加固支护多采用钢筋混凝土衬砌,岩体质量好的只衬砌顶拱,岩体质量差的要全断面衬砌。60年代以后地下工程技术进步,地下厂房洞室广泛采用锚喷支护和预应力锚索加固围岩,在洞室交叉处及地质条件很差的地段常采用钢筋混凝土衬砌。

(李必如)

dixianshui

地下水 (groundwater) 埋藏在地壳岩石中的各种形式的水。地下水按在岩石体中存在的形式和埋藏条件可分为不同的类型。地下水是工农业和生活用水的重要供水来源之一,也与各种工程建设,如兴建水库、矿山和大型建筑物等,关系密切。

地下水在岩石体中存在形式的分类和特征 ①气态水。即水蒸气,和空气一起充填在岩石体的空隙中,它从压力大的地方向压力小的地方流动,亦即由温度高的地方向温度低的地方流动。当岩石体中空气冷却到露点或更低时,气态水能凝结为液态水,而在相反的情况下则变为蒸发。蒸发和凝结对岩石体中的水分重新分布有很大影响,气态水不能直接为植物所吸收。②吸着水。受岩、土颗粒的分子引力和静电引力作用牢固地吸附在岩、土颗粒表面上的水,只有在 105~110℃

时不断加热,吸着水才能从岩土中排出。它的主要特点是不受重力作用影响,不传递静水压力,不能直接为植物所吸收。③薄膜水。指水气继续凝结,岩、土颗粒吸附的水分子逐渐加多,包围在吸着水外面,而使水膜加厚的这部分水分子。薄膜水也受岩、土颗粒的分子引力和静电引力作用保持在岩、土颗粒上。它不受重力作用影响,不传递静水压力,但能从水膜厚的地方向薄的地方移动,能被植物根系吸收。④重力水,又称自由水。当薄膜水的厚度再增大时,岩、土颗粒对外层水的作用力逐渐减小,最后这种力量不能平衡水的自重,薄膜水变为液态水滴,受重力影响而在岩石体空隙中运动。重力水能传递静水压力,是水文地质研究的主要对象。⑤毛细水。是由毛细力作用而保持在岩石体毛细孔隙或毛细裂隙中的水。通常毛细水分布在潜水面之上,并与潜水直接连通。毛细水能传递静水压力,能被植物根系吸收,地下水面离地表较浅时,毛细水有时会引起土壤沼泽化或盐碱化、以及路基和地基冻胀、路面翻浆等。毛细水的研究在农业和工程建设方面有很重要意义。⑥固态水。以冰的形式存在于岩石体中的水。常见于多年冻结区的岩土层中。在多年冻结区外,寒冷季节也有季节冻结的固态水。弄清多年冻结层的厚度,对开采矿产和为了供水而取用地下水,都有很大意义。

地下水埋藏条件的分类和特征 ①包气带水。位于潜水位以上岩石体中的暂时性水,一般分为两种:一为岩石体中的吸着水、薄膜水和毛细水;一为局部隔水层上的上层滞水。它们在农业上具有比较重要的意义。②潜水。地表以下第一个隔水层以上具有自由水面的地下水。潜水接受大气降水补给,潜水位易受降水影响而有季节性变化。潜水面可以自由升降,潜水一般埋藏浅,分布广,开采方便,是重要的供水水源,但易受污染。③承压水。充满于上、下两个隔水层之间的具有承压性质的地下水。当钻孔钻穿上部隔水层时,孔中水位会上升超过含水层的顶板达到稳定,从稳定水位到含水层顶板的铅垂距离称承压水头。承压水头超过地面就能喷出地面形成自流水或上升泉。承压水由于上部有隔水层,不直接受降水和蒸发的影响;又由于距补给区远,其水质、水量和水位的变化小,承压水是良好的供水水源。

地下水含水层含水空隙形状的分类和特征 ①孔隙水。分布于岩石体孔隙中的地下水。它主要分布于松散沉积层中。第四纪的冲积、洪积与冰水沉积的砂层和砂砾石层中地下水的水量大,水质也较好,可作为供水水源。②裂隙水。分布于岩体裂隙中的地下水。它主要分布于断层破碎带和地表风化裂隙中,水量一般比孔隙水少。③喀斯特水。又称岩溶水,分布于可溶性岩层的溶蚀裂隙与溶洞中的地下水。由于喀斯特发育程度

及气候条件的不同,岩溶水的埋藏条件是多种多样的。一般溶洞大、裂隙宽时岩体透水性强,但分布不均匀。如大气降水充沛,则喀斯特水丰富。喀斯特水有良好的供水水源。但对于矿坑与地下建筑物施工会产生灾害性的突然涌水。

地下水的性质及其评价见水质。

(赵鹤勤)

dixing celiang

地形测量 (topographic survey) 在控制测量的基础上,应用测绘仪器和工具测定地球表面地貌和地物位置及高程的工作。主要包括平面与高程加密、地形测图和清绘整饰等。

地形测图是在控制测量结束后,将控制点展绘在白纸裱糊的图板或聚脂薄膜上,地物以测定地物轮廓或中心位置,用符号、注记或真形的几何形状表示,地形以测定地面坡度变换点、集水与分水线等,用等高线配合地貌符号及高程注记点等表示其特征。地形图的要素有地貌、水系、道路、管线、境界、植被、居民地及测量控制点等。限于图面负载,实际地貌与地物必须根据图面及比例尺综合取舍,等高线间距宜适当选定,以充分显示特征。测图方法有野外实地测图和航空摄影测图。野外实地测图有平板仪测图法、小平板配合经纬仪或水准仪法,还有不常使用的经纬仪测记法等。全站型测距仪问世后,可应用该仪器自动记录地形点的读数与计算值,并将记录输入计算机处理后输出到电子绘图仪进行自动绘图。航测内业成图包括应用卫星影像、航空摄影像片及地面摄影像片等资料,在模拟或解析测图仪上测绘地形图(见摄影测量、航空摄影测量)。

水下地形测量是测绘江、河、湖、海、塘的水下地面形状的工作,是水电工程测量中不可缺少的部分。水深点的平面位置测定,当流速不大、湖河面较窄时,一般采用视距法或断面法定位;在流速大或水域宽阔时多数应用测角交会、测距交会定位,或用先进的无线电交会定位等。水深测量在浅水区往往用测深锤与测深杆;深水区则用回声测深仪。水深测量开始与结束时,均需测定工作区内上下游的水面高程,以便换算水底高程,勾绘水下地形。

中国水利水电工程测量以连续测绘满幅,面积在50 km²以上的测区为限额以上测区、按国家规范作业与分幅;限额以下采用统一分幅或矩(正方)形分幅。《水利水电工程技术名词术语标准》中明确规定大比例尺地形图为1:500至1:5000,中比例尺地形图为1:10000至1:50000,小比例尺地形图为小于1:50000的地形图。

随着社会发展的需要和技术进步,地形测量所提

供使用的图件发生了很大变化,除常规提供的线划图之外,有用航空像片经正射纠正后,保持地面各种信息、比例尺一致的影像图或将地貌以等高线表示与影像套合、地物以影像为主的影像地图。这两种图具有既保留了图面与实地特征完全一致的丰富信息,又经纠正保证比例尺均一的特点。在电子计算机应用于测绘之后,把地形图数字化,以数字形式储存在磁盘(带)上,经过数据处理,以地面数字模型直接供计算机辅助设计使用,并可以通过磁盘(带)提供几种不同比例尺的图纸输出。这样可克服过去不易改变图面比例尺和图纸伸缩应用不便等困难(中国已完成1:1000000比例尺的地形图数字化),这是今后发展的主要趋向。

(茅玉清)

diyīnglì

地应力 (geostress) 见地应力测试。

diyīnglì ceshì

地应力测试 (measurement of geostress)

测定天然状态下赋存于岩体内部的应力场的技术。地球在各种动力运动过程中,在地壳中产生各种应力场,使地壳物质处于其综合作用之下,产生了内应力效应,这种应力即地应力。从岩石工程来说,岩体地应力主要来源于地质构造运动和岩体自重。它对正确认识岩体的力学性质,研究围岩的破坏机制,掌握地应力对岩石工程(如坝基、地下建筑物、岩石边坡等)的影响,充分发挥围岩的自承能力,都是极为重要的。地应力测试方法有应力解除法、应力恢复法和水压致裂法3种。地应力测试的地球物理法(包括声发射率法、声波法、地震波法)和电阻率法也在研究中。

应力解除法 分为孔壁应力解除法和孔底应力解除法两种。①孔壁应力解除法。从岩石表面向岩体内先钻一测量孔,孔深超过表面松动范围和应力集中区,然后在孔内安设测量元件,如钻孔变形计、压磁应力计或孔壁应变计等。前者按径向以45°间隔布置,后两者以120°间隔布置。在测记初始值后,在测量孔外用同心套钻钻取岩芯,使岩芯与围岩脱离。在套钻过程中同时测记各测量元件的读数,直到作用在岩芯上的应力被解除而产生弹性恢复,各测量元件读数不变时停止套钻。根据应力解除前后测得的变形或应变差值,计算出地应力的大小和方向。用孔壁应变计可实现单孔全应力测量,但对应变计的粘贴防潮技术要求高。②孔底应力解除法。将测量元件(以闭塞式应变计为代表)安装在磨平的钻孔底部岩石面上,并继续钻进,测量钻孔端部岩芯应力解除前后的应变变化量,据此计算地应力。与孔壁应力解除法相比较,要求解除的岩芯短且费用

di 地

较低。

应力恢复法 先在岩石表面安设测微计（如钢弦式应变计、电阻片式应变计、千分表等），测记初始值后进行垂直于岩面的切割，以解除岩体中的应力，同时测记测微计读数变化，而后将液压枕插入切槽中，并灌注水泥砂浆填实。待水泥砂浆凝固后，利用液压枕向岩体加压，直到测微计恢复到初始值，此时的压力即为岩体中的地应力值。这种测试方法简便，但只能在岩体表面，且主应力方向为已知时，测量地应力的大小。

水压致裂法 目前测量地壳深部地应力的唯一方法。其前提是：①岩石为线弹性各向同性。②岩石是非渗透性的。③岩石中有一主应力分量与钻孔轴线平行。试验时先钻一深孔达所需部位，用可膨胀的橡皮封隔器封隔一段钻孔，泵入液体对这段钻孔加压，同时记录液压随时间的变化。当增压到孔壁岩体破裂时，压力随之下降，经稳压一段时间后停止加压，待压力降到某一定值后结束试验。根据测试结果，绘制压力与时间关系曲线，按弹性力学理论计算出地应力值。如在试验段用印模橡胶套筒向孔壁加压，可在其上印出破裂印痕。印痕方向也可用井下定向仪、钻孔电视或超声波钻孔电视测定。

（黄仁福）

dizhen

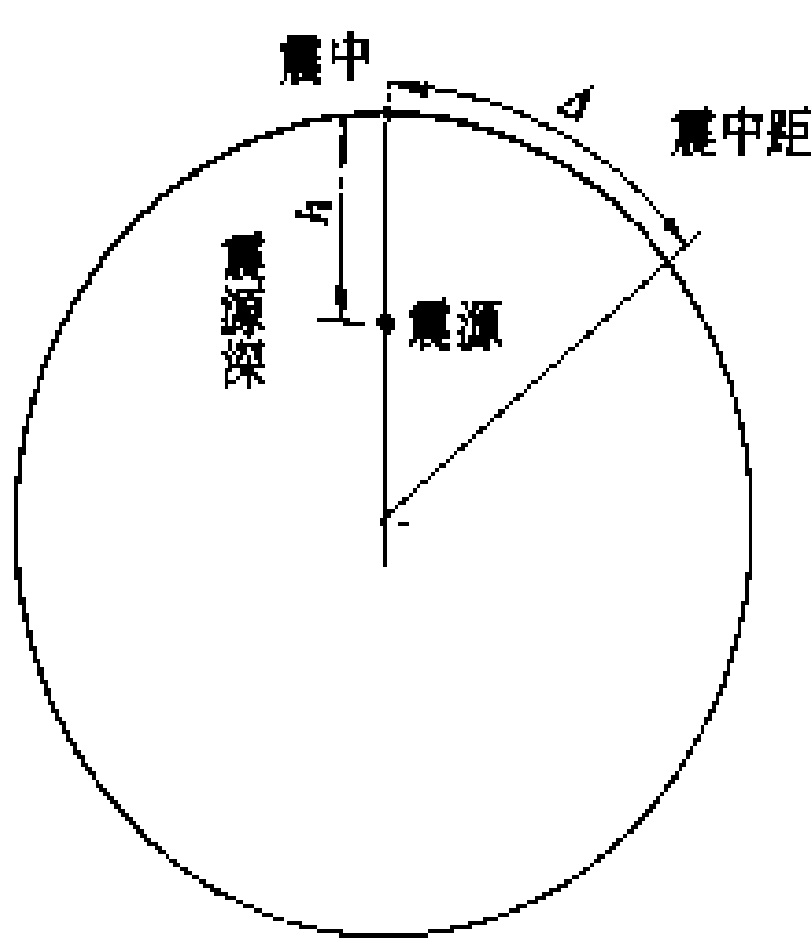
地震（earthquake） 一种突发的地表震动现象。按其成因可划分为构造地震、火山地震和陷落地震。构造地震因地下岩层突然破裂引起，其破坏性大，影响面广，大多数地震属于此类。

全世界每年发生数百万次地震，其中能造成严重破坏的平均约为 18 次。主要集中在太平洋沿岸和阿尔卑斯两条活动地震带上。中国处于两大地震带中间，是一个多地震国家，有数千年的地震记述历史。

在一定时间序列内相继发生在相近地区的、在成因上有联系的一系列大小地震称为地震序列，其中最强烈的一次称为主震，主震前后的地震分别称为前震和余震。少数地震主震不突出，或者前震和余震非常小。地球内部构造破坏发生地震的地方称为震源。震源（中心点）在地面上的投影称为震中，其到地面的垂直距离称为震源深度（ h ）。震中位置以经度、纬度来标志。从震中到观测点沿地球表面大圆弧测量的距离称为震中距（见图），可用弧线距离或对应的地心角（ θ ）表示。 $1^\circ=111.1\text{km}$ ，震中距小于 100 km 的称地方震，大于 1000 km 的称远震，介乎其间的统称近震。

地震时由震源向各个方向传播的弹性波称为地震波，包括体波和面波。体波在地球内部传播，又分为纵波和横波。纵波又称 P 波或压缩波，其介质质点的振

动方向与波的传播方向一致。横波又称 S 波或剪切波，其介质质点的振动方向与波的传播方向垂直。体波到达地表层沿地球表层



震源和震中示意图

h —震源深度； Δ —震中距

传播的称面波。纵波传播速度最大，横波波速一般约为纵波的 60%，面波波速稍低于横波。一般地震波波速随地层深度而增大。地震时的地面运动是这些波在地层界面不断折射、反射后累加形成的不规则的

复杂空间运动。

地震震级(M)是表示地震本身大小的尺度，通常取为在规定的震中距和标准地震仪上取得的地震波图上最大幅值的对数值。根据近震体波或远震面波测定的震级分别以 M_L 和 M_S 表示，中国地震部门规定按 M_S 上报。 M_S 和 M_L 间的换算公式为 $M_S=1.13M_L-1.08$ ，通常 $M<2$ 称为微震， $M=(2\sim4)$ 称为有感地震， $M>5$ 称为破坏性地震， $M>7$ 称为强烈地震。用统计法求得的震级(M)和地震波释放的能量(E)间的经验公式为 $\log E(\text{尔格})=11.8+1.5M$ 。震级差一级，能量约差 30 倍。目前世界上发生过的最大地震为 8.9 级。

对应一定震级的一个地震，受其影响的某地一定范围内地面震动的平均强度称地震烈度，各地地震烈度随震源深度、震中距和场地地形地质条件而不同。

参考书目

地震工程概论编写组，地震工程概论，第二版，北京：科学出版社，1985

（陈厚群）

dizhen tiedu

地震烈度（earthquake intensity） 表示地震时在一定地域范围内的地面震动平均强弱程度的尺度。震中区的烈度称为震中烈度（ I_0 ），它与震源深度有关，对一定震级（ M ）来说，震源深，则震中烈度低，但影响范围大。中国大多为震源深度小于 60 km 的浅源地震，其 6~7 级地震对应的震中烈度为 VII~IX 度。评定烈度的标准称为烈度表。已有的烈度表主要以人的感觉、器物反应、建筑物的破坏和地表现象等宏观现象的描述为主。目前国际上较普遍采用的是划分为 12 度的修正麦卡利（Mercalli）烈度表，简称 MM 烈度表，日本采用划分为 8 度的 JMA 烈度表，两种分度法的大体对应关系为 $I_{MM}=1+1.5I_{JMA}$ 。中国 1980 年编制的新的《中国地震烈度表》也采用 12 度分度法。中国、日

本和苏联等国的烈度表已把烈度的宏观标志和地面运动物理量相对应,给出了烈度的定量参考范围。在地震工程中通常采用地面最大加速度作为与烈度对应的物理量,基于实测最大加速度的统计平均值给出相应的标准。加速度常以重力加速度 g 度量, $1g=9.81\text{m/s}^2$, $1g=1000\text{ gal}$ (伽),大体上,烈度每差一度,加速度约差一倍。根据统计资料,任意两个互相垂直的水平分量基本接近,竖向分量则大致为水平分量的 $1/2\sim 2/3$ 。也有采用速度、位移或其他物理量作为烈度定量标准的。地震烈度随震中距增大而衰减,其衰减规律随地区而异。每次地震用烈度表示的等震线称为等烈度线,通常接近椭圆形。

在工程设计中,以往基本烈度和设计烈度都按确定性方法确定。基本烈度表示某地区今后一定期限内,在一般场地条件下可能遭遇的最大烈度。基本烈度不包括局部场地条件引起的烈度变化,对工程场址的具体地质、地形和地基条件等因素造成的小区域烈度异常,以往曾采用场地烈度的概念调整烈度。中国目前已不采用这种增减烈度的方法,而是在抗震设计中从场地选择、调整地基承载力和其他地面运动参数等方面加以考虑。以基本烈度为基础,根据建筑物的重要性按抗震规范作适当调整后作为抗震设计中实际采用的烈度称为设计烈度或设防烈度。近年来拟改为在地震危险性分析基础上,以地震烈度作为地震动参数,用概率法确定工程场址至少遭受一次超过某个给定地震烈度的年发生概率。

(陈厚群)

dizhen weixianxing fanxi

地震危险性分析 (seismic hazard evaluation)

对特定区域确定其在未来一定设计基准期内地震动参数超过某一给定值的概率的方法。此法于 20 世纪 60 年代末提出,基本思想是:针对地震作用在时间、空间和强度上的随机性,作为随机现象,通过概率方法分析研究,给出工程所在场地在未来一定设计基准期内确定其地震动参数(烈度、加速度、速度、反应谱等)超过某一给定值的概率。

地震危险性分析的主要内容包括:①划分潜在震源及选择震源模型。②确定各震源的地震活动性。③选择从震源到场地的地震作用衰减规律。④计算场址地震效应年超越概率。⑤进行不确定性校正。

潜在震源通常是在取定的以场址为中心、半径约为 300 km 的圆周范围内,主要根据区域性地震活动特点和地质构造条件,参照地质类比和历史地震重复性判定。基于断层破裂模型,对已知断层走向、长度和位置的划为线源,对位置不完全确定的划为宽条带

源,对构造位置和走向都不确知的则划为面源,并假定在震源区内地震发生位置的空间分布是等概率的。根据历史地震资料,可确定各个震源的震级上下限及震级-频度关系参数以求得不同震级地震的累积分布概率及地震的年平均发生概率 V_i 。根据历史地震宏观等震线或强震观测资料,归纳出所在地区地震动参数的衰减规律。假定地震作用的大小及其在空间、时间上的分布在统计上是独立的,可以给出各个震源使场址地震动参数值 Y 超越某给定值 (y) 的概率 $P_i(Y>y)$ 。假定地震发生次数在时间上符合泊松分布,则可求得由各个震源造成的场址地震效应的年超越概率 $P_{ii}=1-e^{-\sum P_i(Y>y)}$ 。累加各震源的影响得出总的年超越概率 P_i 。对给定设计基准期为 T 的超越概率为 $P_T=1-(1-P_i)^T$ 。最后在对上述各分析步骤中的不确定作适当校正后给出工程场址地震危险性分析的结果。20 世纪 80 年代开始,中国已在二滩、拉西瓦、瀑布沟、小湾等工程中应用这一方法。

当前中国对地震危险性的研究动向为:就分析中假定震源区地震活动性在空间均匀分布和年发生概率在时间上是平稳的这些问题,在充分利用我国丰富的历史地震资料基础上,依据近年来频繁发生强震的背景下,在中长期预报中积累的经验和研究成果,在地震危险性分析中更合理地考虑地震活动性的时空特点,以及改进分析中各项不确定因素的定量化。

(陈厚群)

dizhi gouzao

地质构造 (geological structure) 地壳运动中岩层和地块受力后产生的变形和变位的形迹。地壳运动使原始产状近于水平的岩层和地块变形、破裂、变位形成褶皱、断层、节理等各种地质构造形态。这些构造形迹常成组(带)产生,反映了某种方式的构造运动和构造应力场。地质构造按涉及范围大小可分为显微构造、中小型构造、大地构造(或称地壳构造)。显微构造是指露头范围内、手标本或显微镜下观察到的构造形态;中小型构造指一定区域范围(如水库区、坝区)的地质构造;大地构造指大至全球的地壳构造。

构造地质学研究地质构造形迹,推论分析地壳运动及其发展规律。苏联习惯分为:构造地质学(structural geology)以论述小型地质构造;区域构造学(tectonics)以论述区域地质构造;大地构造学(geotectonics)以论述全球地质构造。在中国和欧美国家常把后两者包括在前者内。

对地质构造形态、产状的调查、对其成因和分布组合规律的研究以及对其力学机制和演变历史的分析是工程地质水文地质勘察的基础工作之一。对论证工程

di 地

地区的区域构造稳定和岩体稳定、地下水(特别是承压水)的储存条件、水库和建筑物的工程地质条件都是十分重要的。

(郝绮霞)

dizhi niandai

地质年代 (geological time) 表明地质历史时期的先后顺序及其相互关系的地质时间系统。地质年代包括相对地质年代与绝对年龄。相对地质年代是指不同时代地层间相对的新老关系或形成先后次序;绝对年龄是表示地层岩石、矿物形成的实际年龄。确定地质年代是研究地壳地质发展历史的基础,也是研究区域地质构造和编制地质图的基础工作。

中国及国际通用的地质年代表

地 质 年 代			距今年数 (百万年)	地壳运动
代	纪	世		
新 生 代 (K ₂)	第四纪 (Q)	全新世 (Q ₄)	2~3	喜 马 拉 雅 运 动
		上更新世 (Q ₃)		
		中更新世 (Q ₂)		
		下更新世 (Q ₁)		
	第三纪 (R)	上新世 (N ₂)	25	
		中新世 (N ₃)		
渐新世 (E ₃)		80		
始新世 (E ₂)				
古新世 (E ₁)				
中 生 代 (M _z)	白垩纪 (K)	上白垩世 (K ₂)	140	燕 山 运 动
		下白垩世 (K ₁)		
	侏罗纪 (J)	上侏罗世 (J ₃)	195	
		中侏罗世 (J ₂)		
		下侏罗世 (J ₁)		
	三叠纪 (T)	上三叠世 (T ₃)	230	
中三叠世 (T ₂)				
下三叠世 (T ₁)				
古 生 代 (P _z)	二叠纪 (P)	上二叠世 (P ₂)	270	海 西 运 动
		下二叠世 (P ₁)		
	石炭纪 (C)	上石炭世 (C ₃)	320	
		中石炭世 (C ₂)		
		下石炭世 (C ₁)		
	泥盆纪 (D)	上泥盆世 (D ₃)	375	
		中泥盆世 (D ₂)		
		下泥盆世 (D ₁)		
	志留纪 (S)	上志留世 (S ₃)	440	加 里 东 运 动
		中志留世 (S ₂)		
下志留世 (S ₁)				
奥陶纪 (O)		上奥陶世 (O ₄)		
中奥陶世 (O ₃)				
下奥陶世 (O ₁)				
寒武纪 (E)	上寒武世 (E ₃)	600		
	中寒武世 (E ₂)			
	下寒武世 (E ₁)			

续表

地 质 年 代			距今年数 (百万年)	地壳运动
代	纪	世		
元 古 代 (Pt)	震旦纪 (Z)	上震旦世 (Z ₁)	1700	吕 梁 运 动 五 台 运 动
	上元古 (Pt ₂)	中震旦世 (Z ₂) 下震旦世 (Z ₁)		
	下元古 (Pt ₁)		2050	
太 古 代 (Ar)	上太古 (Ar ₂)		2400~2500	
	下太古 (Ar ₁)		>2500	

注:1. 本表摘自《中国四百万分之一地质图》,中国地质科学院,1973。

2. 表中各纪绝对年龄的起迄与各国测定资料略有出入。

地质年代确定方法 相对地质年代主要依据地层层序、化石、岩性以及地层接触关系等确定。①地层层序法:未经后期变动情况下,沉积岩地层的层序是老的地层在下,新的地层在上。当发生倒转褶皱或逆掩断层等构造变动时,老地层才能覆盖于新地层之上。②化石法:在不同的地质年代均有其特有的生物,因而利用地层中所含的标准化石可确定其地质年代。③岩性比较法:按同一时代、同一环境下所形成的地层岩性特征大致相似的原则确定地层的相对年代。④岩层接触关系法:被岩浆岩侵入或穿插的地层,其地质年代较岩浆岩老,沉积在岩浆岩上的地层则较岩浆岩新。绝对年龄是根据岩石中所含的放射性同位素恒定的蜕变速度测定的。

地质年代与地层系统单位 国际上通常用代、纪、世等年代单位表示地质年代,用界、系、统等地层单位分别对应代、纪、世等时期内形成的地层。

(邹小安)

dianli dianliang pingheng

电力电量平衡 (balances of electric power and energy) 电力系统电力和电量的供需平衡。又称电力系统运行模拟,用于研究各类电站在电力系统中优化运行方式及分系统间功率的优化交换,从而核定各方案的容量和电量效益。它是制定电力规划、设计和运行计划的重要组成部分。

内容和对象 包括电力平衡和电量平衡两部分,这两部分是相辅相成的有机的整体。研究内容按时间长短可分为日(周)平衡和年平衡。日(周)平衡的时段单位常用1h或数小时,年平衡的时段单位常用月、

周或数月。研究对象可分为：①工作容量平衡。②检修容量平衡。③备用容量平衡。

类型 根据系统负荷、水文和参加平衡的电站容量的随机性，电力系统电力电量平衡可分为确定型和随机型两种。

(1)确定型。按系统电力负荷、备用容量均为已知，水电站的水文为确定型。其平衡的条件是，在各时段系统容量和能量均应满足负荷要求（含厂用电和输电损失）。

(2)随机型。电力负荷按随机变量处理，水电站的水文按随机型考虑（有时为了简化，水文按确定型考虑）。系统各电站参加平衡的机组数（或容量），决定于其强迫停运率（forced outage rate, FOR, 为机组因故障强迫停运时间与强迫停运时间加运行时间之和的比值）。从概率的意义上说，系统的用电不可能完全满足，故模型的目标函数应按系统失负荷概率（lost of load probability, LOLP, 为系统有效发电容量不能满足负荷要求的概率）和所失负荷的重要性，计入与所失负荷相应的费用的数学期望值。

确定型较简单直观，但不够严密。随机型较严密，但工作量大。

电力电量平衡的条件 电力电量平衡一般按下述条件进行。

(1)系统电力负荷应为主网受端的用电负荷，不包括电站的厂用电和专用输电线的线损，这部分厂用电及线损，应在电力电量平衡中计入。

(2)系统工作容量平衡、检修容量平衡和备用容量平衡应当作为一个整体，结合进行。各类容量应能相互转化。

(3)与设计保证率相应的设计枯水年的电力电量平衡，确定电站的容量效益。电量效益则应对各种可能的水文情况进行电力电量平衡，求得其相应的数学期望值。

(4)对分为若干区的较大的电力系统，电力电量平衡应包括各分区间的功率交换。

电力电量平衡的原则 应在满足以下约束条件的前提下，使系统总费用最小。

(1)对确定型的电力电量平衡，系统电站的容量和能量均应满足系统容量（含工作容量、备用容量和检修容量）和能量的需求；在考虑厂用电和专用线损的前提下，水、火电站和抽水蓄能电站均应保证其能量的平衡。

(2)火电厂的机组出力应不小于其技术最小出力。

(3)水电站出力应尽可能满足强制基荷的要求，若不能满足时，应计入因此引起的附加费用。

(4)各类电站参加平衡的容量，应扣除由于不良工

况而引起的不能发出的受阻容量。

电力电量平衡计算 其内容包括检修容量、工作容量、备用容量平衡及其优化方法。

(1)检修容量平衡。系统内每台机组均需定期分别安排连续的大修时间。在中国规划设计中，每台机组年平均大修时间，水电站常用1个月，火电厂常用1.5个月。系统中每台机组的容量乘以每年所需的大修历时，叫机组所需的检修面积。机组检修应首先利用系统负荷季节性下降部分，安排检修，若负荷季节性下降部分不敷检修时，应增加火电容量。根据水电站的特性，水电站的机组检修季节应避开汛期和负荷大的月份，宜安排在汛末。火电机组则宜安排在汛期。在常规计算中，即可根据上述原则，逐台安排机组检修，直至安排完所有机组为止。优化计算，可用纯整数规划的方法解决，即以0-1变量描述机组的检修计划，0为不检修，1为检修。目标函数可用系统总费用最小或电力系统平均装机容量为最小，但计算工作量很大。另一种方法是搜索法，其优点是速度快，且其结果也接近最优。在宏观规划中，常用较粗略的方法，即在每个电站的装机容量中，扣除其每年应检修的份额，如水电站按每年检修1个月计，即扣除其容量的1/12后进行平衡。

(2)工作容量平衡。一年中各月，以日或周为代表进行平衡。所有各电站扣除厂用电和专用线损后的主网受端各小时出力（含功率交换）之和，应等于主网受端相应各小时的负荷。

日或周的平衡，常规算法用切负荷的方法，逐个电站进行平衡。当一个电站平衡完毕，将该电站已分配的负荷及电量累积曲线有关部分切去，形成新的负荷曲线和电量累积曲线，据此再进行下一个电站的平衡。按经济原则，水电站不耗燃料，故应首先利用其容量和电量，最先引入，进行平衡，水电站中各电站的次序则可任意安排。其次引入火电厂，火电厂中各电厂，则应以燃料费用（含厂用电及线路损失）从小到大的次序进行平衡。由于抽水蓄能电站只进行二次能源的加工，并且在加工过程中要损失一部分能量，故应安排在最后引入。抽水蓄能各电站，则应以综合效率从大到小的次序引入，进行平衡。

各类电站工作容量的平衡有不同的方法：①水电站按径流调节计算得到的月平均出力，换算成工作日（周）的能量，按充分利用其容量和电量的原则，进行平衡（见工作容量）。②火电厂则从电量累积曲线的原点起按其工作容量向上安排其工作位置。应校核是否满足技术最小出力的其他要求，若不能满足，则应按后进先出的原则，减少已引入电站在负荷低谷时的出力，使之满足。③抽水蓄能电站应分别进行发电和抽水工况的平衡，发电能量不应大于抽水能量乘其综合效率

的积。

(3)备用容量平衡。其中包括事故备用容量和负荷备用容量的平衡。用于确定型的电力电量平衡,需遵循

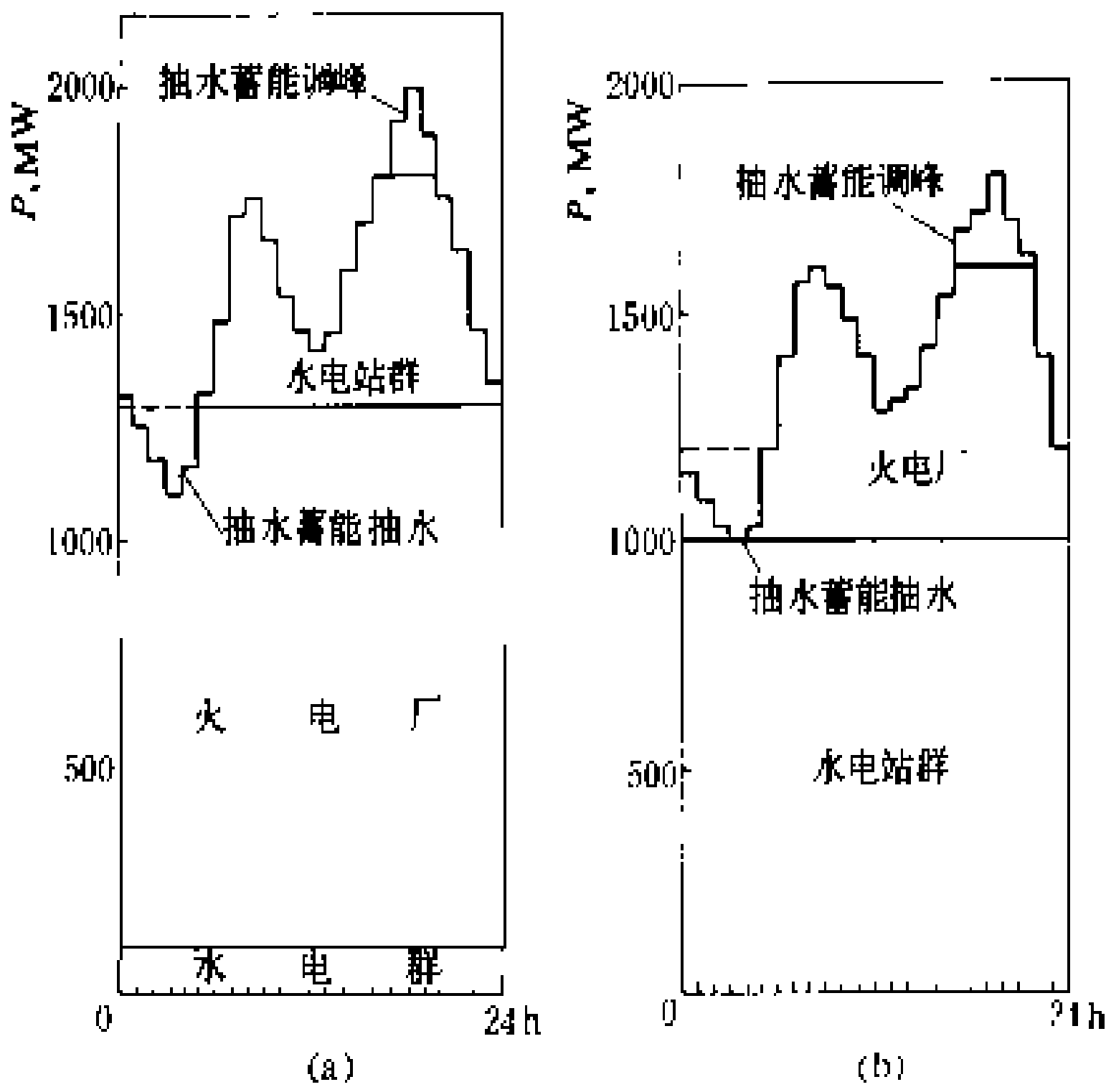


图1 电力系统电力电量日平衡图
(a) 1月份; (b) 7月份

如下的原则:①系统所有电站总备用容量之和,应大于等于系统需要的备用容量。②水电站所担负的备用容量,应有足够的库容保证水电站的备用能量。若水电站主要备用库容设在上游水库,则还应在本梯级设置缓冲库容,以保证当上游电站下泄的备用水量到达本电站前的用水需要。③火电厂所担负的备用容量,应不大于机组最大出力与技术最小出力之差值,并应有备用燃料。④长引水道电站,应少担负或不担负备用容量。

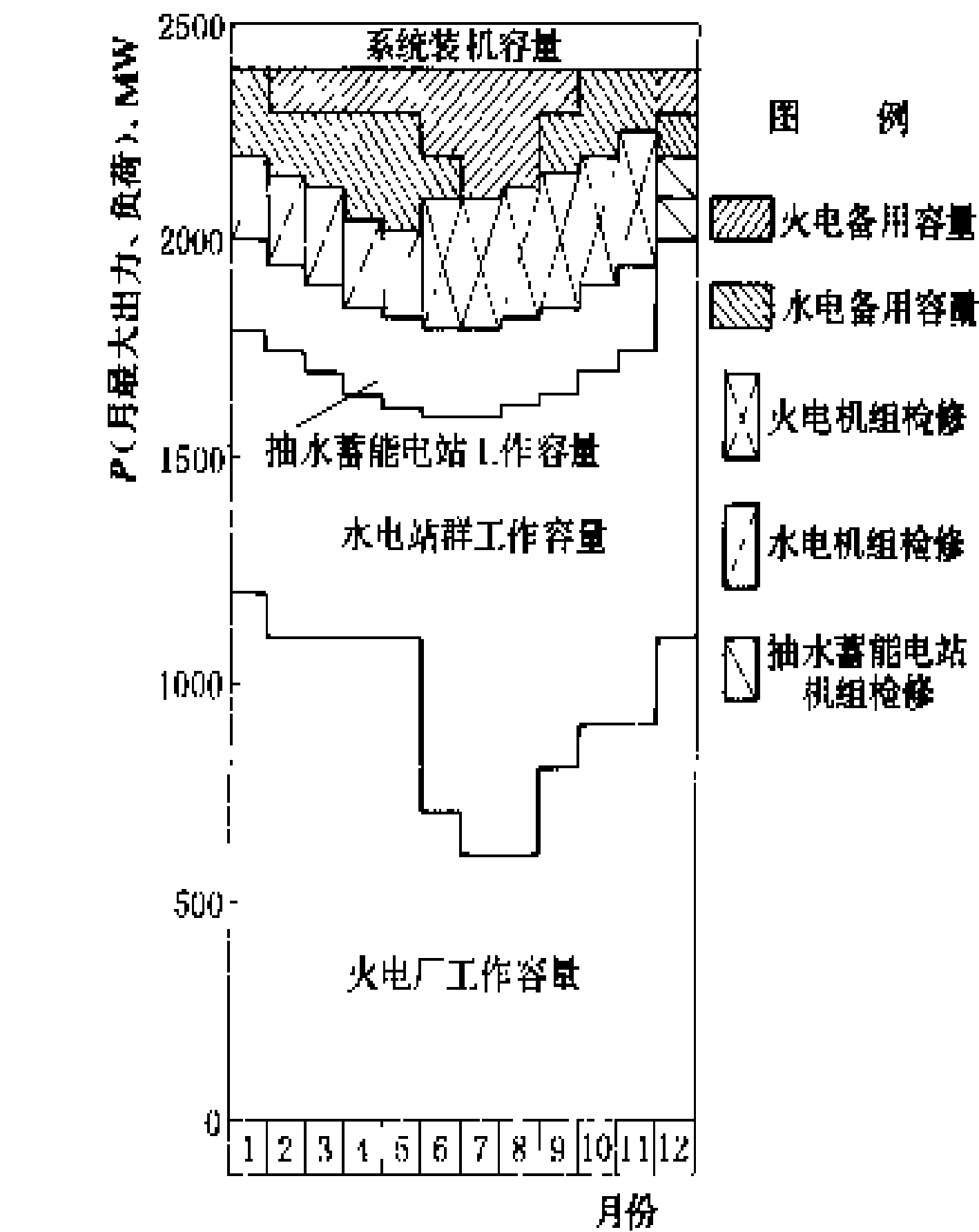


图2 电力系统年电力平衡图

(4)优化方法。常用电力电量平衡的模拟模型,多为线性规划模型。较严格的方法是将水电站(群)的补偿径流调节计算,与系统电力电量平衡在同一个模型中进行,这样可使水电站(群)的水库调度的优化与电力电量平衡的优化,有机地结合起来。

模拟模型对系统工作容量的平衡,均将系统负荷按自大至小排序,化为负荷历时曲线(台阶状的负荷)。为了减少非零元素,常用“Z替代法”处理,即将电站在各时段所担负的负荷,换算为与相邻“台阶”的差值。

优化方法可考虑火

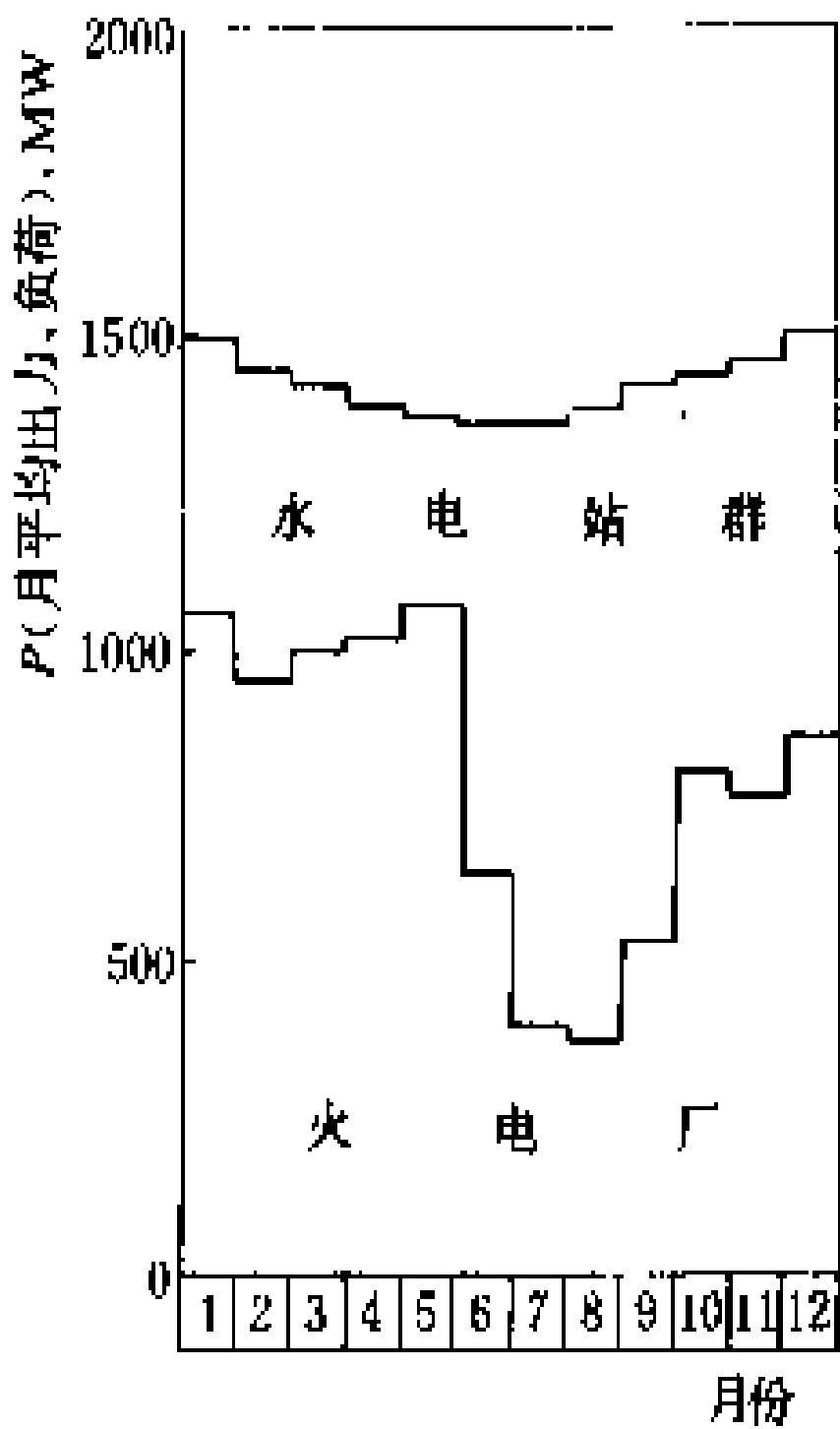


图3 电力系统年电量平衡图

电厂的非线性煤耗特性,可同时解决各电站在系统中的最优运行方式、分系统间的错峰(即各分系统最大负荷非同时出现)和最优的功率交换(见水能利用优化)。

电力电量平衡可用平衡表或平衡图来表示。电力电量平衡图如图1~3所示。

(伍宏中)

dianqi erci shebei anzhuang

电气二次设备安装 (erection of secondary electrical circuit equipment)

水电站各类电气二次设备的元器件和屏柜的检查、组装、配线、就位以及调整试验的施工过程。电气二次设备包括水轮发电机组、变压器、输电线路、高低压配电装置、闸门及启闭机、船闸、升船机、筏道等设备的控制系统、继电保护、测量(见电气量测量和非电量测量)、自动化(见水电站自动化)、信号系统和远动等的元器件、屏柜和连接电缆,是保证水电站电气一次设备及全厂安全经济运行、操作监视及保护的配套辅助设备。电气二次设备安装包括:上述系统的元、器件安装前的检查,屏、柜安装,电缆敷设和配线,回路绝缘电阻测定和绝缘耐压试验,有关设备的极性检查,回路通电模拟试验,继电保护装置的检查试验和整定等。

元、器件安装前的检查 电气二次设备的元、器件有各种类型的继电器(如保护继电器、中间继电器、信号继电器、时间继电器等),各种仪表(如电压表、电流表、有功功率表、无功功率表、有功电能表、无功电度表、功率因数表、转速表、温度表、压力表等),各

种变送器、传感器、控制开关、按钮、信号灯以及各种不同用途的自动化元件。所有这些元、器件开箱后都应进行清扫、外观检查和必要的调整试验,然后按照设计图纸安装到屏、柜上。

屏、柜安装 屏、柜安装在基础槽铁上,基础槽铁要求平直无弯曲,水平度要求水平误差为 $1/1000$,全长不超过 5 mm ,可以在浇筑混凝土前埋设,也可以预留位置在浇混凝土后埋设。过去在埋基础槽铁时同时埋设基础螺栓,现在采用膨胀螺栓,安装屏、柜就不必事先埋设基础螺栓。

屏、柜开箱后清扫检查,按照设计图纸安装就位,校正屏的水平和垂直,水平误差每米不超过 1 mm ,垂直误差每米不超过 $2\sim 3\text{ mm}$,屏与屏之间的间隙不宜过大,一般不超过 2 mm 。

电缆敷设和配线 电缆在敷设前检查其绝缘和外表是否有损伤,电缆的绝缘电阻一般应在 $500\text{ M}\Omega$ 以上,外皮没有机械损伤。电缆按设计图敷设,排列整齐,尽量避免交叉。高于 1 kV 与 1 kV 以下的电缆分开放在不同层的电缆架上,电压高的电缆放在上层。控制电缆不要和电力电缆穿在同一根管内。控制电缆中间不允许有接头。

电气设备安装和电缆敷设完毕后,即可以开始配线。配线前仔细审查和校对图纸。根据所需的长度剥去电缆外部绝缘,做好电缆芯线接头。对于没有颜色区别芯线的电缆,还要用对线的方法将每一根芯线从电缆两端测试,对好并标上线号,然后连接到相应的端子或器具上。

回路绝缘电阻测定和绝缘耐压试验 电气二次设备安装和电缆配线工作结束后,对每一条回路测量绝缘电阻。每一回路的对地绝缘电阻不低于 $1\text{ M}\Omega$,水力机械自动操作回路不低于 $0.5\text{ M}\Omega$ 。当回路绝缘达不到上述要求或发现接地时,应查出绝缘受潮或接地的部位和原因并设法加以消除。绝缘电阻合格后,按照规程规定对每一回路进行交流耐压试验。

回路通电模拟试验 试验的目的是检查二次回路的设计和安装是否正确,相互动作是否合乎逻辑。试验是在机组不通水、不转动,高压电器设备不带电的情况下进行。试验的方法是对每一条控制、信号、测量、同步(见同步系统)、励磁(见水轮发电机励磁)等交、直流回路通以额定工作电源,按照设计原理图逐步进行动作检查。当有些条件不能满足时,可用临时短接触点的方法使回路连通。对交流回路在通电前先检查设备的极性、相序和接线组别,符合要求后再通以额定电流或电压。模拟试验时蝴蝶阀或球阀、水轮机导水叶、断路器及其他自动装置以及压缩空气、冷却水和压力油、信号灯等都按实际情况参加试验。

继电保护装置的检查试验和整定 对于发电机、变压器、线路等电气设备的继电保护装置在设备安装、电缆敷设和配线工作全部结束后,分别在电压互感器或电流互感器的二次端子上通以电源,调整电压或电流,检查继电保护装置的动作值,使其符合继电保护整定的要求。试验时将电压互感器或电流互感器的二次绕组从互感器的端子上拆下,以防止互感器一次侧感应危险的高电压。

(王 冰)

dianqiang celiang

电气量测量 (measurement of electrical quantities) 机电设备运行中电气参数的检测技术。主要测量电流、电压、有功功率、无功功率、频率、电能等电气量,以供控制、调节、监视、制表记录、数据传输之用。这些电气量通常用电气量测量仪表直接进行检测,也可以通过变送器配仪表或自动检测装置检测。

电流测量 分交流电流测量和直流电流测量。在发电机定子回路、变压器、输电线路、厂内配电线路、母联断路器、母线分段断路器、旁路断路器和连接桥断路器、 40 kW 及以上的电动机回路等处测量交流电流;在发电机励磁回路、蓄电池组充电回路、浮充电回路测量直流电流。

电压测量 分交流电压测量和直流电压测量。在发电机定子回路、各级电压母线等处测量交流电压;在发电机励磁回路、蓄电池组的直流母线、充放电回路等处测量直流电压。有些交、直流电压测量仪表还兼作有关回路的绝缘测量。

功率测量 分有功功率和无功功率测量。在发电机定子回路、升压变压器、 60 kV 及以上的输电线路、旁路断路器、母联兼旁路断路器、分段兼旁路断路器等处均需测量有功功率和无功功率。作调相运行的发电机,有功功率表带有反向标度,反向标度一般为正向标度的 20% ,对于抽水蓄能电站的发电电动机有功、无功功率表均需带有反向标度, 35 kV 线路、电站内 3 kV 及以上的厂用变压器和厂内配电线路等处测量有功功率。容量为 200 MW 及以上和担任调频或尖峰负荷的水电站,有的装设全厂总加有功功率表和记录型全厂总加有功功率表。不担任调频或不带尖峰负荷的 $50\sim 200\text{ MW}$ 的水电站仅装设全厂总加有功功率表。

频率测量 在发电机定子回路、高压母线装设频率表,在中央控制室装设一只为监视电力系统频率的数字显示式频率表。担任调频和容量为 200 MW 及以上的水电站内,装设记录型频率表。

电能计量 在发电机定子回路、变压器、输电线



路、旁路断路器、母联兼旁路断路器、母线分段断路器、厂用变压器、厂区配电线路等处装设有功电能表,可作调相运行的发电机和抽水蓄能电站的发电电动机装设两只具有止逆机构的有功电能表。在发电机定子回路、升压变压器、输电线路、旁路断路器、母联兼旁路断路器和分段旁路断路器等处装设无功电能表,对于抽水蓄能电站的发电电动机装设两只具有止逆机构的无功电能表。有的水电站还装设全厂电能总加装置或由计算机监控系统实现电能总加。

电气量测量仪表 水电站中主要使用指针式和数字式两类仪表:

(1) 指针式仪表是将被检测的电气量转换成测量机构可动部件的偏角位移带动指针偏转。技术较简单、监视较直观。至今仍被广泛使用。

(2) 数字式仪表是将被检测的电气量变换为数字显示。便于直接读数、反应快、精度高。

变送器 将电压、电流和功率变换成小电流(毫安级)、低电压(几伏)的直流电量输出,将电能计量变换成脉冲或数码输出,以便与电气测量仪表、远动装置、巡回检测、计算机监控系统、功率总加器、电能总加器配合使用。

(张稳平)

dianqi shebei

电气设备 (electrical equipment) 发电、输变电和用电过程中完成电磁能与其他能量形式的转换、电压转换、电力传输和电力电路投切等功能的电器和装置的总称。水电站的电气设备按其作用一般分为发电设备、发电机电压设备、变电设备、开关站设备、厂用电设备等。

发电设备 主要指水轮发电机,它是水电站生产电能的主要设备。

发电机电压设备 这些设备是指从发电机出口到变压器低压侧的电路中所连接的各种电器,其电压等级通常为 3.3~24 kV,且具有额定电流和短路开断电流大、动力稳定和热稳定性要求高的共同特点。主要包括断路器(包括发电机专用断路器)、隔离开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、发电机中性点接地用的消弧线圈(接地变压器或电阻)、发电机停机用的电制动装置和大电流母线等。

发电机专用断路器 水电站常用的设备之一。在下列情况,一般需在发电机主出线的出口处装设发电机专用断路器:①扩大单元接线。②联合单元接线。③发电机与三绕组升压自耦变压器或三绕组升压变压器的单元接线。④在电力系统中承担调峰的水电站,在发电机主出线引接厂用电电源,当发电机停止运行时,需

由升压变压器向厂用电电源倒送电的单元接线。⑤小型水电站接在汇流母线上的发电机。

(1) 发电机专用断路器的型式与应用范围。按其灭弧介质分类,主要有少油、六氟化硫(SF₆)、空气 3 种类型的断路器。其应用范围主要根据发电机额定电压等级、额定电流大小和电站计算短路电流值来确定。一般少油断路器主要用于发电机额定电压为 6~10 kV,额定电流 3000 A 及以下,短路电流在 50 kA 以下的发电机主出线;六氟化硫(SF₆)断路器一般用于额定电压 24 kV 及以下,额定电流 12000 A 以下,短路电流 120 kA 以下的发电机主出线;空气断路器则用于额定电压 24 kV 及以下,额定电流大于 12000 A 和短路电流大于 120kA 的发电机主出线。

(2) 水电站发电机专用断路器使用特点。除径流式水电站外,一般水电站都具有调峰能力,在电力系统中水轮发电机都做调峰运行,每天起停机操作频繁。所以对发电机专用断路器要求有较高的机械和电气寿命,具有频繁操作的能力。此外,发电机电压电路中,短路电流的非周期分量较大,一般为周期分量峰值的 0.8~0.9 倍,发电机断路器还需满足这一要求。

隔离开关 合分无载电路的设备,起电路间隔离的作用,常用结构型式有两种,其一是动静触头为刀闸垂直式合分结构,用于与开敞式母线连接,另一种是与大电流离相封闭母线连接用的,它的动静触头则为水平插入式合分结构。

消弧线圈 水轮发电机中性点接地的常用设备。中国、苏联等国规定,当发电机电容电流超过 5 A 时,中性点采用经消弧线圈接地的方式。当发电机内部一点接地时,由于消弧线圈的补偿作用,使通过故障点的电容电流值限制在允许值范围内,避免发电机定子铁芯烧损。其电弧接地过电压比中性点不接地方式有所降低,发电机接地保护只作用于信号,使一点接地的发电机仍能短时继续运行,便于运行人员转移负荷。大容量水轮发电机中性点也有采用高值电阻接地方式的,发电机一旦内部发生单相接地故障,零序保护动作于停机。

电制动装置 见水轮发电机组停机制动。

大电流母线 当发电机额定电流在 8000 A 及以上时通常采用大电流离相封闭母线,将发电机三相引出的导电母线分相封闭在铝壳内。按其外壳电气连接方式一般分为分段绝缘式和全连式两种。

(1) 分段绝缘式离相封闭母线。由于外壳只有涡流屏蔽而无环流屏蔽,其壳外磁场强度降低有限,且外壳上的短路电动力较大,中国除早期在刘家峡水电站使用外,目前已较少采用。

(2) 全连式离相封闭母线。每相外壳连成整体,用

短路板在两端将三相外壳互连接地,使三相外壳在电气上成为一个闭合回路。运行时外壳上产生一个与母线电流方向相反数值近似相等的感应电流。由于外壳电流对母线磁场的屏蔽作用,使其周围钢构几乎不存在热损耗,短路时母线相间电动力大大削弱。

大电流离相封闭母线的冷却方式。根据额定电流大小和计算要求,可采用自然冷却方式或强迫通风冷却方式。一般在同一尺寸条件下采用强迫通风冷却,可使母线载流量提高 0.5~1 倍。当采用自然冷却的离相封闭母线时,对严重潮湿或严重污秽的恶劣环境中的大电流封闭母线,也有向外壳内供给略高于壳外大气压力的干燥清洁空气(气压约为 1.02~1.03 倍大气压力),以形成微正压,避免外部潮湿或污秽空气进入封闭母线内,防止绝缘子结露闪络。这就要求外壳连接缝具有一定密封能力。

变电设备 水电站中主要是升压变压器和联络变压器。升压变压器是把发电机电压升高到输电电压的主要变电设备。联络变压器用于开关站两种升高电压之间的相互连接,使两种升高电压的电力系统方便地交换功率。

水电站常用的升压变压器型式有三相、单相和三相组合式。由于水电站多处于山区,受地形和枢纽布置条件限制,一般采用三相式。只有在受到运输尺寸和重量的限制时,才采用三相组合式或单相式。对布置在屋外的变压器,当通风条件较好时采用强迫油循环风冷式,通风条件差时则采用强迫油循环水冷式。对布置在屋内或地下的变压器,都采用强迫油循环水冷式。

开关站设备 是指从变压器到输电线路连接端之间电路中所连接的各种类型电器,主要包括断路器、隔离开关、电流和电压互感器、避雷器、接地开关、耦合电容器、阻波器、变压器中性点接地装置和导体、电力电缆等。其电压等级从 35 kV 到 1150 kV。设备一般布置在屋外,要考虑环境温度、湿度、风速、日照、冰雪、污秽以及水电站水雾、泥雾等环境条件的影响。除此之外,这些设备符合一般电气设备规定的技术要求即可,水电站无特殊要求。

厂用电设备 它包括从厂用变压器到水电站辅助生产设备的各类电机和电器,其电压等级高压为 6 kV 或 10 kV,低压为 0.4 kV。除厂用变压器、厂用电动机外,一般采用成套高压开关柜或低压配电屏,安装在厂内的厂用变压器,一般采用干式变压器,以适应地位狭窄和防火的要求,但价格较贵。装在厂外的厂用变压器,则采用油浸式变压器。对于与大电流离相封闭母线直接连接的厂用变压器,为避免发电机电压回路发生三相短路,一般采用单相干式变压器。

(黄贤鉴)

dianqi yici shebei anzhuang

电气一次设备安装 (erection of primary electrical circuit equipment)

水电站各类电气一次设备按设计位置组装、调试和连接,以便与电力系统形成回路的施工过程。水电站电气一次设备包括:水轮发电机、发电机电压母线、主变压器、断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、电抗器、耦合电容器、开关站母线及其附件;动力电缆和厂用电设备。

发电机安装 见水轮发电机安装。

发电机电压母线安装 发电机电压母线按形状分槽形、矩形、菱形、管形、离相封闭母线等。电流小的采用矩形母线,电流大的则采用槽型、菱形以及离相封闭母线。

发电机电压母线,一般用铝锭或铜锭压制成板材或型材。母线表面应光洁平整不得有三角口、裂纹、折叠及夹杂物,母线应平直且厚度均匀。允许纵向弯曲度:铝为 1.5 m 长度内不超过 3 mm,铜为 1 m 长度内不超过 4 mm。符合要求后,可进行加工焊接。首先母线应矫正平直,矩形母线一般皆冷弯成型。母线断面和接触面加工应平整,无氧化膜。经加工后,铜母线截面减小值不超过原截面的 3%,铝母线截面减小值不超过 5%。封闭母线螺栓搭接表面应镀银。

矩形、槽形、菱形母线焊接所用填料的物理性能和化学成分应与原材料一致。焊接后,焊缝表面无肉眼可见的裂缝、凹陷、缺肉、气孔及夹渣等缺陷、咬边深度不得超过母线厚度的 10%,长度不能超过焊缝长度的 20%。一般不进行透视检查。

相同布置的主母线、分支母线、引下线及设备连接线应对称一致,横平竖直,整齐美观。硬母线的连接应采用焊接、贯穿螺栓搭接或用夹板或支持螺栓搭接。管形和圆形母线,可采用专用线夹连接,但不得用内螺纹管接头连接或锡焊。母线安装完毕清扫后应进行试验。

主变压器安装 包括主变压器运输、绝缘油处理和按正常顺序安装。

(1) 主变压器运输。大容量变压器受运输的限制,一般都不带油运输。为了保证变压器器身绝缘强度,变压器出厂启运前,油箱内都充有露点为 -30~-40℃ 的干燥空气或纯度为 99.9% 的氮气,压力为 0.01~0.03 MPa,同时油箱上装有监视箱内干燥气体压力变化的压力表。制造厂应提供箱内干燥气体压力随环境温度变化的关系曲线附在油箱外壁上,以便随时检查压力变化情况,补充干燥气体。500 kV 级的变压器出厂启运前在油箱顶部装有冲击记录仪,测量运输过程中变压器受冲击的情况。冲击水平以重力加速度 g 来衡量:日本标准定为纵向、横向、垂直三个方向均限在

dian 电

3 g 以内;中国采用的标准为前进方向小于 4 g。横向与垂直方向均小于 3 g;有的国家的制造厂规定为 1 g。该值在订货时议定。

(2) 绝缘油处理。绝缘油品质的好坏,直接影响变压器绝缘强度和绝缘件的寿命。绝缘油的绝缘强度受油中水分和杂质影响很大。绝缘油处理就是除去油中固体微粒、水分、气体等杂质。绝缘油主要由贮油罐、高真空滤油机、阀门、油管等组成的油处理系统进行处理。贮油罐和滤油机尽量靠近变压器,三者之间距离约 10~15 m 左右。

绝缘油运到现场必须取油样化验。若是用油罐车运来,每罐取样化验。若是用油桶装来,按规定取一定桶数的油样进行化验,同时每桶取样进行比较,以防混油。

新油的绝缘强度高于 30 kV、含水量小于 30 μm 时可采用高真空滤油机过滤。若绝缘强度低于 30 kV、含水量高于 30 μm 时,则采用压力滤油机过滤,待达到上述要求时,再用高真空滤油机精滤。制造厂随设备供应的油应符合有关规定。

(3) 安装顺序。①首先验收箱体及附件基础的水平、中心和高程符合要求。②检查运输时的冲击记录、箱体气压。③绝缘油应经过抽样检查、过滤直至合格。④对所有附件进行外表检查、冷却器应经耐压试验、必要时需用合格油冲洗,瓦斯继电器及温度计要经过校验。⑤排出箱内残油的同时往箱内吹干燥空气,直至排完残油。⑥安装好各附件。⑦用热油循环使箱内温度高出环境温度 10~15℃,然后排油,进箱内检查紧固件有无松动、箱内有无杂物,检查完毕封闭箱体,抽真空注入合格绝缘油。⑧静放 72~120 h 后,打开各部放气塞放气,取油样试验达到标准后进行各项电气试验。⑨在安装、试验过程中作好施工记录和试验记录。

断路器安装 断路器有多油断路器、少油断路器、压缩空气断路器、SF₆ 断路器(包括气体绝缘金属封闭电器)、真空断路器等,灭弧原理基本一致,仅是灭弧介质不同。

设备运到现场后,首先进行验收检查:①开箱清点,规格应符合设计技术要求。②附件、备件、产品技术文件均应齐全。③外观检查应无锈蚀,无机械损伤,瓷件表面无裂缝、裂纹、损伤,瓷铁件粘合牢固,绝缘件表面应清洁无损伤、无变形,无受潮现象,带油运输设备不应有渗油,充气密封组件表压应不低于制造厂规定的允许值,各焊缝良好,油漆完整。

对于高压和超高压断路器,安装前应检查基础中心距离及高度,其误差不应大于 10 mm;预留孔、预埋铁板中心的误差不应大于 10 mm;预埋螺栓中心误差不应大于 2 mm。气体绝缘金属封闭电器的基础中

心距离及高程误差不超过 2 mm。

安装后通过调整与操作试验来检验断路器各项性能是否符合产品规定。对油断路器内的油应取油样作耐压试验。空气断路器和 SF₆ 断路器(包括气体绝缘金属封闭电器)都要检验漏气量,不应超过规定值, SF₆ 气体含水量应不超过允许值,安装全部结束后,应作安装记录和调整试验记录。

隔离开关安装 首先进行开箱清点,设备规格应符合设计要求,附件、备件、产品的技术文件应齐全;外观检查,应无锈蚀、无损伤,焊缝良好,油漆完整,瓷件质量良好,接线端子及载流部分清洁且接触良好,底座转动部分动作良好,液压操动机构油位正常、无渗油现象。

隔离开关组装时一定要按产品出厂编号进行吊装,切不可混装,吊装时要用设备吊孔,切不可用瓷裙吊装。安装完后应有安装记录和调整试验记录。

互感器安装 电流互感器和电压互感器运到现场后应及时验收检查:①开箱清点、规格应符合设计要求。②附件、备件、技术文件、铭牌都应齐全。③外观检查,应无锈蚀,无机械损伤,瓷件质量良好。④油浸式互感器油位正常,密封良好,无渗漏现象。⑤焊缝良好,油漆完整。

互感器的安装试验应符合施工规范和制造厂的各项要求。安装试验结束后应做好安装施工记录和试验记录。

开关站母线安装 开关站母线分硬母线(管型母线)与软母线两种类型,也可分为单根导线或组合导线两种。

设备器材到现场后,按合同和清单进行清理,同时进行外观检查,管型母线不应有变形扭曲现象,表面光洁平整,不得有裂纹及夹杂物。软母线不得有扭结、松股、断股或其他明显的损伤、腐蚀等缺陷。金具规格符合要求,零件配套齐全,外表光滑无裂纹、伤痕、砂眼、锈蚀,滑扣等缺陷,锌层不应有剥落现象。瓷件质量良好。接头如果用爆压压接,所用的炸药、雷管、导爆索的质量应符合有关专业标准规定;如果用液压压接,其所用的钢模需与所使用导线规格的标准规格相符合。

在基础、构架达到允许安装的强度,构件质量符合要求,高层构架的走道板、栏杆、平台齐全牢固后才可开始安装。安装调试时作好施工记录和调整试验记录。

高压电缆安装 电缆及其附件安装用的紧固件,除地脚螺栓外,应用镀锌制品,电缆终端盒瓷套管的质量应符合规定。

电缆及其附件到达现场后应进行检查:①产品的技术文件是否齐全。②规格是否符合要求,附件是否齐

全。③电缆封端是否严密,当电缆经外观检查有怀疑时应进行潮湿判断与试验。④电缆的压力油箱容量及油压应符合电缆油压变化的要求。

电缆敷设前应进行下列检查:①支架齐全、油漆完整。②电缆型号、额定电压、规格符合设计要求。③电缆绝缘良好,直埋电缆与水底电缆经直流耐压试验合格。④如为油浸电缆,电缆内油样应试验合格。电缆的油压不宜低于 0.15 MPa。

进行施工安装调试时,作好施工记录和试验记录。

厂用电设备安装 包括厂用变压器安装、厂用电屏、柜安装和动力电缆安装。

(1) 厂用变压器安装。变压器到达现场后应及时检查:①变压器油箱及其附件无锈蚀或机械损伤。②油箱盖或钟罩法兰联接螺栓齐全,密封良好,无渗油现象,浸入油中运输的附件其油箱也应无渗油现象。③制造厂技术文件齐全。④瓷件表面质量良好,经各项试验合格后进行安装。绝缘油应符合规范要求,试验完后应作详细的施工记录和试验记录。

(2) 厂用电屏、柜安装。厂用电屏、柜到达现场后应作下列验收检查:①制造厂的技术文件应齐全。②型号、规格应符合设计要求,附件、备件齐全,元件无损坏情况。

设备安装前土建应具备下列条件:①屋顶、楼板施工完毕、不得有渗漏。②室内上建工作基本结束。③预埋件及预留孔符合设计要求,预埋件牢固。④门窗安装完毕、装饰工作全部完成。

屏柜安装后的接地应可靠,油漆完好,屏柜内新装电器元件完好,安装位置正确,固定牢固;二次接线准确,连接可靠,标志齐全,清晰;操动及联动试验动作正确。安装试验工作结束后,应作好详细的施工试验记录。

动力电缆安装 凡所使用的电缆及附件,应符合技术标准,并有合格证件。电缆及附件安装用的紧固件,除地脚螺栓外应用镀锌制品。

电缆及附件到达现场后,应进行下列检查:①产品的技术文件是否齐全。②电缆规格、绝缘材料是否符合要求,附件是否齐全。③电缆封端是否严密。当电缆经外观检查有问题时应进行潮湿判断与试验。

电缆敷设前应进行下列检查:①上建工作全部结束并符合验收规范要求。②电缆支架应齐全,油漆完整。③电缆型号、电压、规格应符合设计要求。④电缆绝缘良好。

敷设电缆时,不应破坏电缆沟和隧道的防水层,电缆不宜交叉,弯曲半径与规范要求相符合,电缆排列整齐,加以固定,装设标志牌。标志牌的规格宜统一,并能防腐且挂装牢固,敷设工作结束后进行试验,并做好

施工及试验记录。

(朱京城)

dianqi zhujiexian

电气主接线 (main electrical connection scheme)

连接电站主要电气设备并接入电力系统以完成输电和分配电能的电路方案。它表明了发电机、变压器和断路器等主要电气设备和输电线路的连接关系和方式,从而完成发电、变电和输电的任务。它是电站电气部分设计、施工、安装、运行的主要依据。

水电站的电气主接线一般包括两个主要部分,即发电机电压侧接线和升高电压侧接线。发电机电压侧接线表明发电机与主变压器的连接关系。发电机经变压器将电压升高后通过高压断路器组成升高电压侧接线,经输电线路与电力系统连接。供电范围和负荷都很小的小型水电站,可能由发电机直配线向用户供电,电气主接线仅有发电机电压接线。

由于大型电站大多位于远离城市的山区,距负荷中心远,输电电压高,供电范围广,在电力系统中占有重要的位置,对主接线的可靠性要求相对较高,要尽可能避免升高电压侧的母线系统故障。

在输电距离长达数百公里甚至上千公里,输电电压高达 750 kV (直流 1 600 kV) 的一些国家,例如美国、苏联、加拿大等,由于系统稳定性问题突出,升高电压侧的接线以采用一个进、出线回路连接到两个断路器的双重连接的接线为多,例如一个半断路器接线、四分之三断路器接线和线路双断路器。

有些情况如输电距离短(数十公里至百余公里),电力系统联系紧密,电力系统稳定问题不突出,但系统短路电流很大时,也有采用双母线多分段接线、正常分段运行以限制短路电流的。

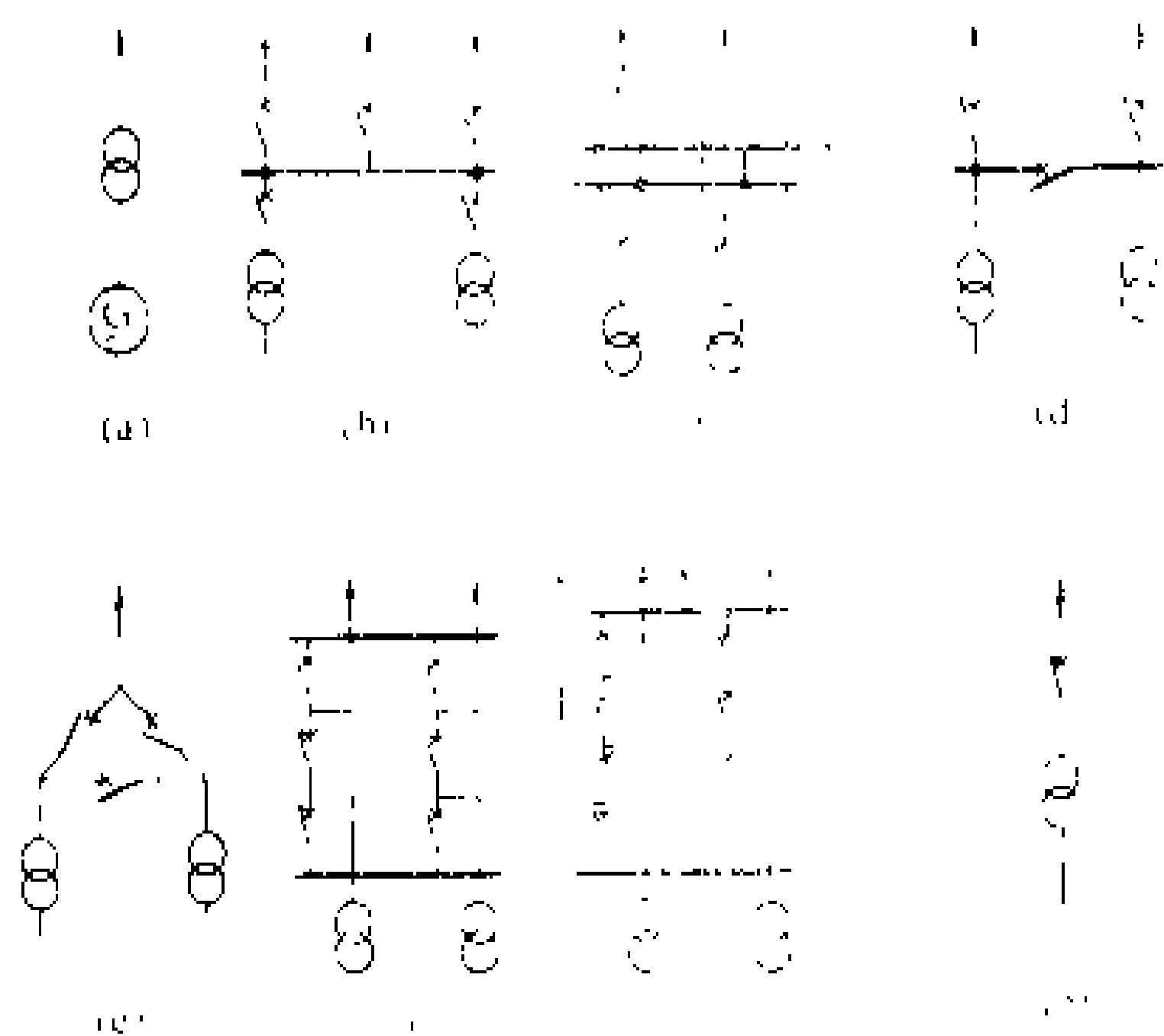
中国已建设的 330 kV 和 500 kV 电力系统,输电距离一般为 100~600 km,介于美、苏和欧洲输电距离之间,和日本的输电距离类似,其升高电压侧接线既有采用双重连接的接线,也有采用双母线或多母线多分段、双母线带旁路母线等多种接线方式,主要是根据电力系统具体条件和地区运行特性而定。

水电站常用的升高电压侧接线类型有:①发电机-变压器组接线;②单母线接线;③双母线接线;④桥形接线;⑤角形接线;⑥一个半断路器接线;⑦四分之三断路器接线;⑧变压器-线路组接线等。如图所示。

主要要求 在设计中根据运行管理、调度管理以及设备制造水平等,做到具体工程具体分析,因地制宜、合理地选定电气主接线。一般用可靠性、灵活性和经济性来综合评价。

(1) 可靠性。主接线要根据电力系统和用电的要

求,保证电能质量和供电的连续性。主接线可靠性计算中要考虑以下因素:①断路器检修时影响供电的概率。



水电站常用的升高电压侧接线类型

(a) 发电机-变压器组接线; (b) 单母线接线; (c) 双母线接线; (d) 桥形接线; (e) 角形接线; (f) 一个半断路器接线; (g) 三分之二断路器接线; (h) 变压器-线路组接线

②线路、断路器或母线故障时以及母线检修时,停运的时间和保证对重要用户的供电概率。③电站全部停运的概率。

美国、苏联、加拿大、日本、英国等国家已有主接线可靠性准则的规定或要求。例如日本对超高压配电装置主接线有如下要求:①多回路共接一母线时,应考虑一回线路故障或检修时,不影响供电。②个别发变电设备(如一台发电机或一台变压器)停运,不影响整个电力系统的正常供电。③遇重大事故,如一段母线故障时,将故障范围限制到不超过整个母线的四分之一;母联或分段断路器故障时,限制故障范围使其不超过整个母线的二分之一。④系统调度、电气设备检修以及事故后恢复正常运行等切换操作要简便。

(2) 灵活性。适应电站不同时期各种不同运行工况要求的能力。对主接线灵活性的要求有:①操作灵活性。能灵活地投入或切除某些机组、变压器或线路,满足电力系统正常运行和事故时电力调度的特殊要求。②检修灵活性。能方便地将主要电气设备、保护装置按计划检修退出运行,而不影响电力系统对用户的正常供电。③发展灵活性。能满足电站初期发电及最终规模的运行要求,并要考虑便于分期过渡和扩展,使电气一次和电气二次设备、装置等改变连接方式的工作量最少。

(3) 经济性。在满足可靠性和灵活性要求的前提下,还要考虑使电气设备的基建投资和年运行费用最省。对主接线经济性的要求有:①主接线要简单、清晰、操作检修方便,并要求能限制短路电流,以减少设备数

量和便于选用价格合理的电气设备。②主接线要为配电装置少占地创造条件,要避免建立复杂的枢纽变电所和尽可能地减少出线电压等级。③合理地选择主变压器的型式、容量和台数,避免重复变压而增加电能损失。

抽水蓄能电站电气主接线 由于抽水蓄能电站的可逆式机组作水泵运行时存在起动的问題,故其主接线除了与常规水电站类同外,还与机组的起动方式(见抽水蓄能机组起动方式)密切相关。①当采用同步或半同步起动方式时,在接线上要设置专用的起动母线及换相隔离开关。它可以设在发电机电压侧,也可以设在高压侧。前者对大容量机组需增设大电流断路器和隔离开关等电气设备;后者因为起动回路阻抗变大,对起动特性有一定影响,要经过技术经济论证来确定。当高压侧电压高于330 kV时,采用在发电机电压侧设置起动母线较多;低于330 kV时则以高压侧设置起动母线为多。②当采用异步全压起动方式时,需在高压侧或发电机电压侧增设换相隔离开关。③当采用异步降压起动方式时,大多是用主变压器低压侧的中间抽头引出电压来起动,需增设半电压断路器和换相隔离开关(中国岗南抽水蓄能电站即采用此种方式)。另外,也有用接入电抗器或专用的起动变压器来降低电源电压的异步降压起动方式。中小型机组还可多台机组合用一套降压设备,但须增设起动母线和切换装置。④当采用同轴电动机起动方式时,设在机组顶部的感应电动机,可由发电机分支线、主变压器第三绕组或厂用电供电。⑤当采用变频起动方式时,变频装置电源可引自主变压器低压侧的分支回路或厂用高压变压器。一套变频装置可分别轮流起动多台机组,但须设置起动母线及断路器。此时,还可采用变频起动为主,同步起动也即背靠背起动作为后备的起动方式。

参考书目

西北电力设计院,发电厂变电所电气接线和布置,北京:水利电力出版社,1984

(潘天缘)

dieliang

叠梁 (stoplog) 使用多根单梁,逐根横向放入门槽,叠合组成的挡水设备。一般用作检修闸门或临时挡水结构。单梁可按孔宽及挡水水头,选用单一的或组合的材料(如木、钢及钢筋混凝土等)制成。叠梁虽有结构简单和起吊力小等特点,但因其叠合缝较多,漏水量大且操作费时。

为防止叠梁漏水量过大,除设计时注意单梁止水的严密性和多梁叠放时止水的连续性外,尚可采取在其挡水面覆盖防漏材料等临时措施。也有设两道叠梁,

并在两道叠梁间填土防止漏水的。

在工程上还采用一种浮式叠梁。它的单根梁能漂浮露出水面，多梁沿门槽高度叠放时，又能逐根压入水下挡水；每根梁在起吊或下放时，均可浮出水面，便于挂钩或脱钩操作，运行管理较为方便。

(沈德民)

ding gai

顶盖 (head cover) 支承导水叶上轴颈、中轴颈、导轴承及主轴伸出侧的封水部件。

顶盖采用箱形结构，导水叶的上轴承均匀布置在顶盖的圆周上。顶盖用外法兰固定在座环上。①混流式水轮机顶盖，见图1。其中心主轴伸出处设置密封装置及固定水轮机导轴承。顶盖上设有供支承控制环用的

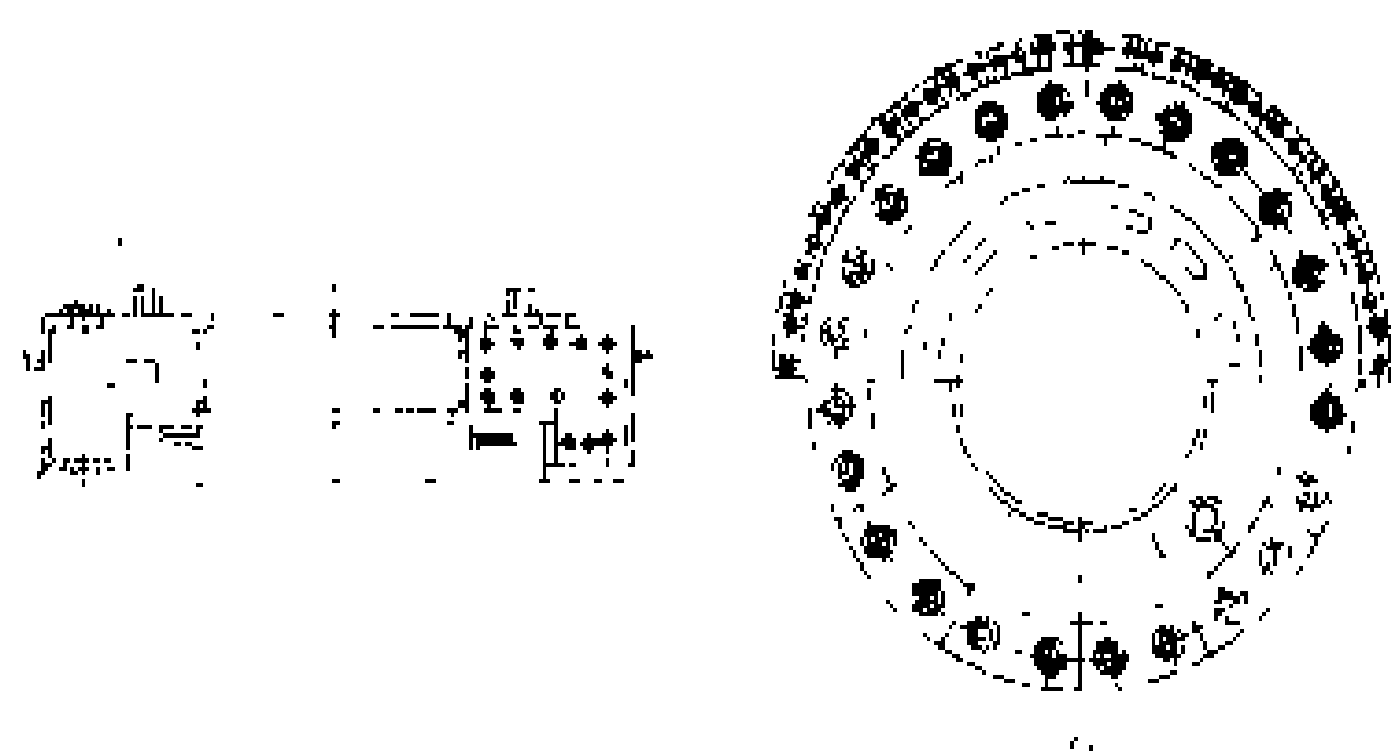


图1 混流式水轮机焊接顶盖

(a) 剖面图；(b) 平面图

- 1—上轴承孔；2—外法兰；3—环形滑槽；4—抗磨板；
5—固定止漏环

环形滑槽。顶盖下部过流表面铺设抗磨板，和转轮止漏环相对的位置装有固定止漏环。导水叶上端面 and 顶盖之间可采用橡胶带密封，高水头水轮机也可直接采用间隙密封。②大中型轴流式水轮机顶盖内还装有支持盖，这样检修转轮时就可以不拆卸顶盖和导水叶，主轴密封、导轴承、控制环滑槽等都设在支持盖上。轴流式水轮机焊接顶盖见图2。

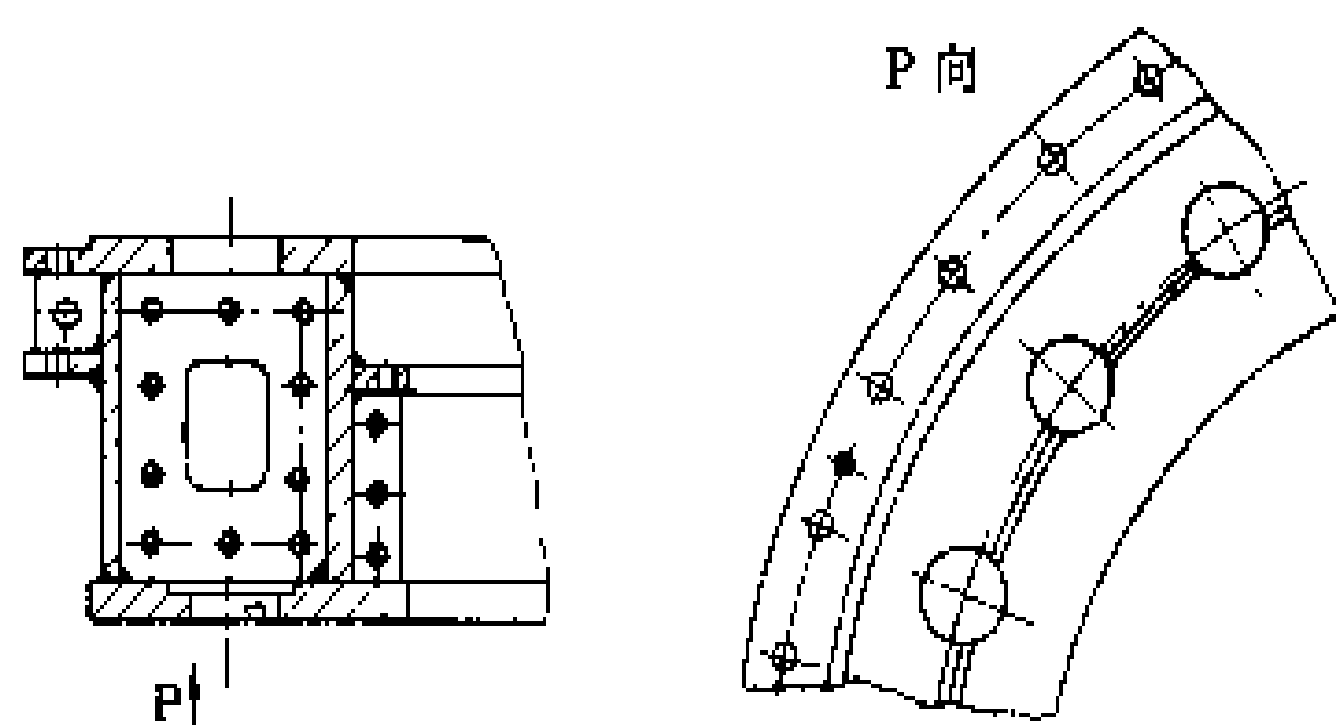


图2 轴流式水轮机焊接顶盖

大中型水轮机的顶盖广泛采用钢板焊接结构。如受运输条件的限制，可以分成2瓣或4瓣，用螺栓组合。小型水轮机的顶盖可采用铸造结构。

(吴次光)

dingxiang baopo

定向爆破 (directional blasting) 将被爆介质沿着预定方向抛掷堆积成一定形状的爆破技术。定向爆破利用物质首先从最薄弱环节破坏的原理，使爆破介质沿从药包中心到自由面的最短距离即最小抵抗线方向抛掷。这种自由面可以是天然地形，也可以利用辅助药包预先爆破形成新临空面，使一定数量的岩石在爆破过程中向预定方向较为集中地堆积成一定形状。

定向爆破常用于填筑堆石坝体、截流、河道裁湾、防汛、改土造田以及其他需要定向的大量土石方爆破工程，具有投资省、进度快、效率高、需用机械设备少，施工简便等优点。

定向爆破筑坝就是将炸药装填在拟建坝址一侧或两侧预先挖好或设法造成的洞室内起爆，将爆出岩石堆积到设计的坝址位置，完成坝体大部或全部土石方填筑任务的施工方法。一般要求爆区地形有一定厚度，岸坡无较大冲沟切割，坡陡岸高，岩性均匀，无大的不良地质构造，节理裂隙能为定向利用，地下水位较低和风化不严重地区。1960年中国在广东省南水水电站用定向爆破筑坝，坝高81.3m，库容 $12.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，装机 $7.5 \times 10^4 \text{ kW}$ ，运行至今。1966年苏联在努列克(Нурек)水电站施工中，用定向爆破法堆筑围堰，堰体高75m，渗流量200L/s，堰顶曾遭洪水漫溢，未受损坏。

(王守道)

Dongfeng Shuidianzhan

东风水电站 (Dongfeng Hydropower Station) 乌江干流上的第二个梯级水电站。位于贵州省清镇县、黔西县境内，距贵阳市88km，有公路相通。装机容量510MW，保证出力110MW，多年平均年发电量24.2亿kW·h。用3回220kV输电线路接入贵州电力系统。混凝土拱坝最大坝高173m。工程于1984年开工，1989年截流，计划于1994年发电。

水文和水库特性 坝址以上流域面积18161km²，占乌江流域面积的21%，多年平均流量345m³/s，多年平均年径流量108.8亿m³。百年一遇设计洪水流量11000m³/s，千年一遇校核洪水流量14400m³/s。水库正常蓄水位970m，死水位936m，总库容10.25亿m³，调节库容4.9亿m³，属不完全年调节水库。电站设计水头117m，最小水头95m，最大水头132m。

枢纽布置 枢纽建筑物由河床混凝土拱坝、左岸泄洪隧洞及岸边溢洪道、右岸引水系统和地下式厂房组成，见图。

坝址区地层除第四系坡积、残积和冲积层外，为三

叠系下统永宁镇组灰岩、白云岩和白云质灰岩,岩性坚

工程施工 施工导流采用过水围堰、一条隧洞导

流方案。导流隧洞设在右岸,进口底坎高程832 m,隧洞尺寸12m×14.13 m,长580 m,按枯水期二十年一遇洪水流量设计。在坝体836 m高程预留3个临时底孔,尺寸为5 m×7.24 m,用作坝体施工后期导流。地面及地下洞室的开挖均采用控制爆破技术(光面爆破及预裂爆破),并在地下厂房及溢洪道高边坡处理中采用锚喷技术作为施工和永久支护。电站主要工程量为:土石方开挖213万m³,混凝土浇筑114万m³,帷幕灌浆29万m³。

设计及施工单位

贵阳勘测设计院设计,水利电力部第九工程局施工。

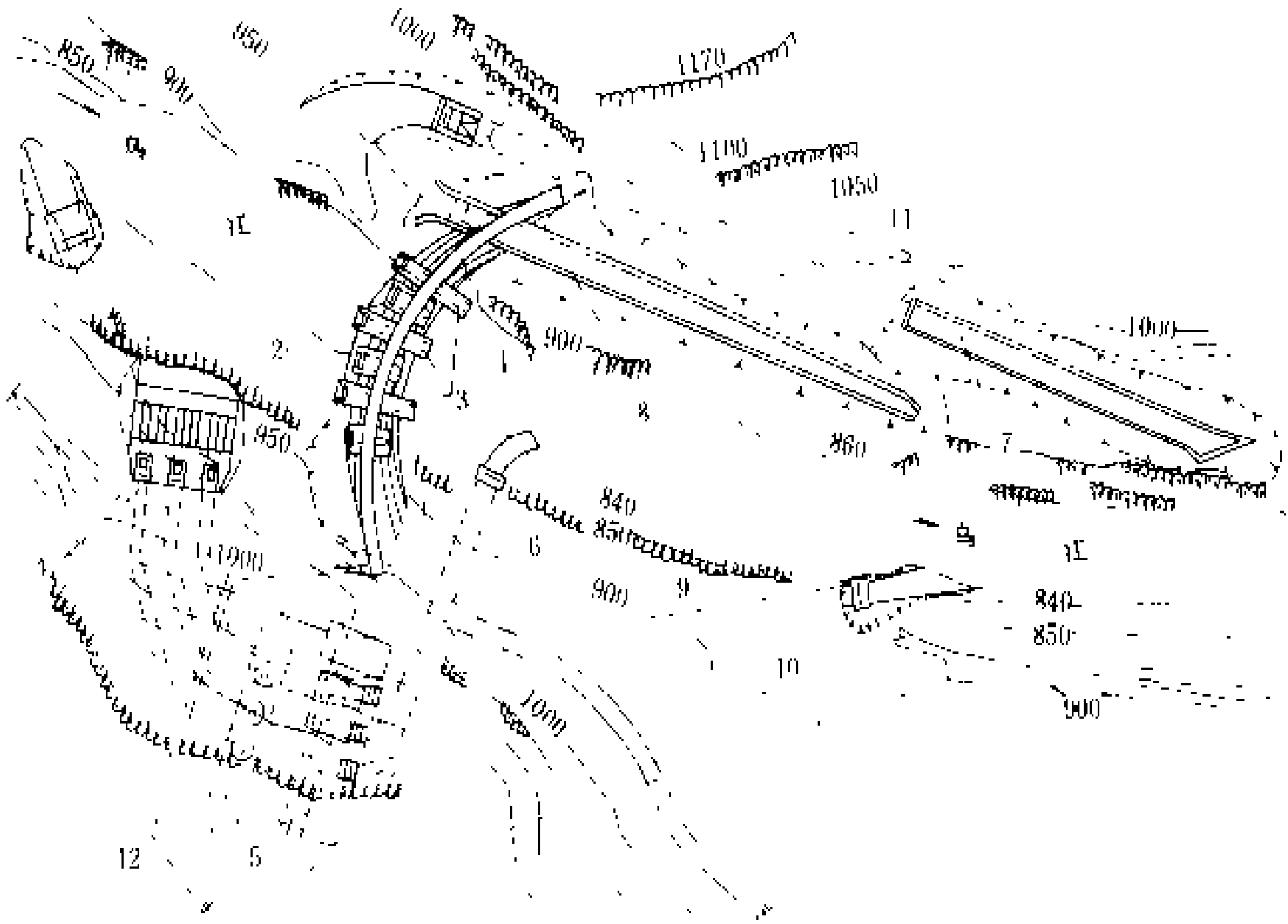
(朱经祥 杨明皋)

Dongjiang Shuidianzhan

东江水电站 (Dongjiang Hydropower Station) 位于湖南省资兴市境内,距郴州市45 km,湘水支流耒水梯级开发的控制性工程。电站以发电为主,兼有防洪、航运、工业用水等综合效益。总装机容量500 MW,单独运行保证出力123 MW,年发电量13.2亿kW·h。以3回220kV线路接入湖南省电力系统。混凝土双曲拱坝,最大坝高157 m。工程于1978年3月开工,1987年10月第一台机组发电,1988年6月全部投产。(参见彩图插页第9页12图)

水文和水库特性 坝址以上流域面积4719 km²,占耒水总流域面积的39.6%。多年平均流量144 m³/s,多年平均年径流量45.4亿m³。千年一遇设计,洪峰流量13900 m³/s,相应库水位289 m;万年一遇加20%校核,洪峰流量24100 m³/s,相应库水位293.4 m,总库容91.5亿m³。正常蓄水位285 m,相应库容81.2 m³,死水位237 m,调节库容56.7亿m³,属多年调节水库。电站设计水头118.5 m,最大水头139 m,最小水头81 m。

枢纽布置 枢纽建筑物由混凝土拱坝,坝后式厂



东风水电站枢纽布置图

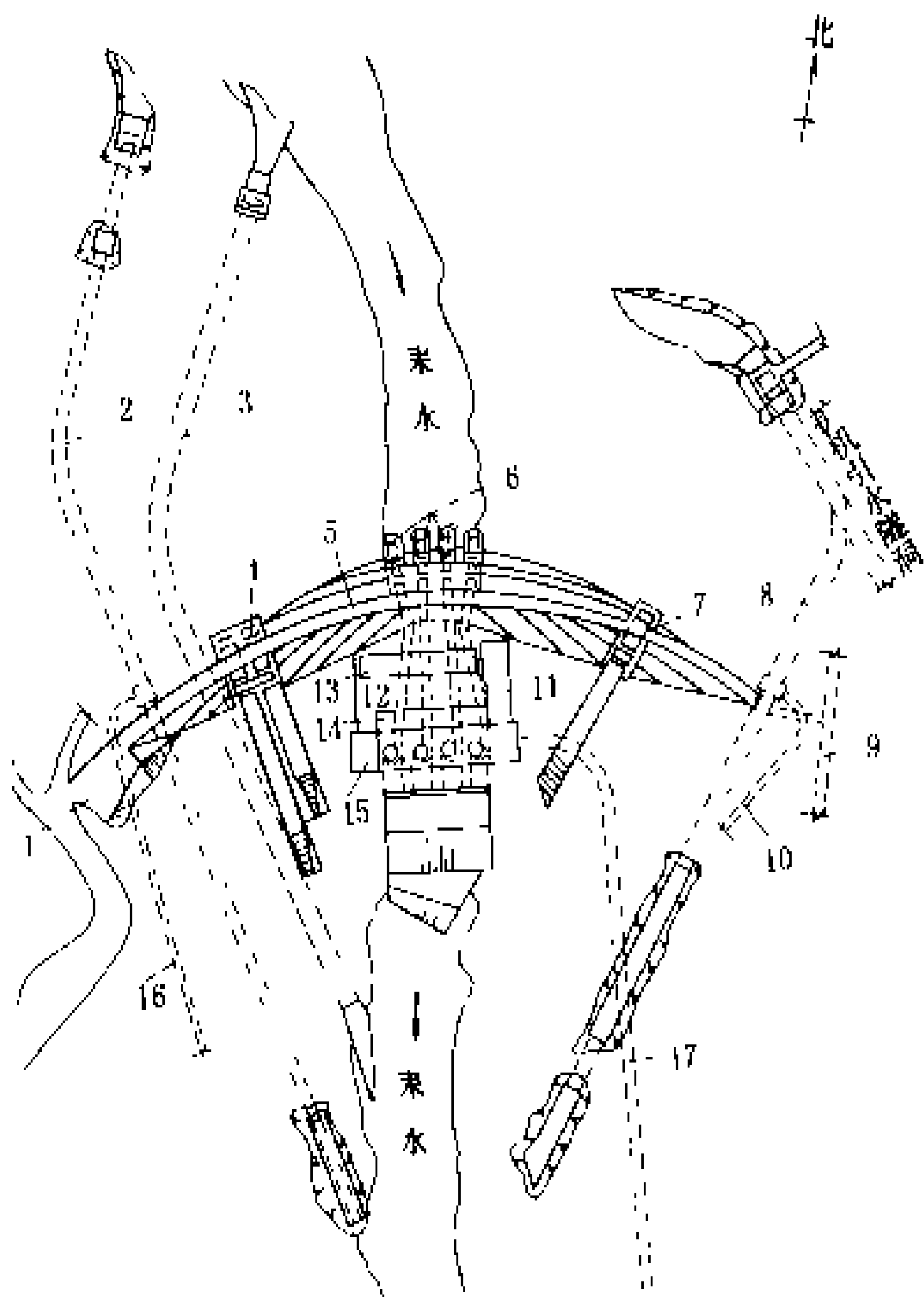
- 1 混凝土双曲拱坝;2 坝身表孔;3 坝身中孔;4 电站进水口;5 地下厂房;6 电站尾水隧洞;7 池洪隧洞;8 溢洪道;9 导流隧洞;10 电厂交通洞;11 上坝公路隧洞;12 帷幕灌浆廊道

硬,喀斯特不甚发育。大坝建基面以下50~60 m处有半坚硬完整的九级滩页岩,可作为良好隔水层。双曲拱坝坝顶高程978 m,坝顶中心弧长254 m,中心角64.56°~94.1°。坝顶宽6 m,最大底宽(厚)27 m,厚高比为0.176。

坝身设有3个表孔和3个中孔。表孔孔口尺寸为11 m×5 m,底坎高程967.0 m,校核情况泄流量为2300 m³/s。中孔的2个边孔孔口尺寸为5 m×6 m,中间孔孔口尺寸为3.5 m×4.5 m,底坎高程为890 m,校核情况泄流量为2620 m³/s。左岸设1条无压泄洪洞,进口堰顶高程为950 m,隧洞尺寸为12 m×20 m,校核情况泄流量为3410 m³/s。岸边开敞式溢洪道1孔,进口堰顶高程为950 m,孔口尺寸15 m×20 m,校核情况泄流量为4225 m³/s。

右岸引水发电系统包括:(1)3条洞径为6.5 m的压力引水隧洞,每条隧洞后接内径为6 m的压力钢管,引水道平均长约227 m。(2)地下厂房,长105.6 m,宽21.5 m,高51.91 m。厂房内安装3台混流式水轮发电机组,单机容量170 MW,转速187.5 r/min,水轮机转轮直径4.5 m,额定流量160.5 m³/s,最高效率95.5%,设计点效率93.88%,吸出高度-4.5 m。(3)主变压器洞,内设3台200 MW的三相变压器。(4)220 kV高压配电装置为气体绝缘金属封闭电器,设在地下。

房,两侧潜孔滑雪式溢洪道,左右岸一、二级放空(兼泄洪)隧洞及库内长盈头木材转运设施等组成,见图。坝址基本地震烈度7度,设计烈度8度。坝基岩体为花岗岩,岩性均一,坚硬完整,断裂不发育。



东江水电站枢纽平面布置图

- 1—重力墩;2—二级放空洞;3—导流洞;4—右岸滑雪式溢洪道;5—坝址;6—电站进水口;7—左岸滑雪式溢洪道;8—一级放空(兼泄洪)洞;9—交通洞;10—交通通风洞;11—副厂房;12—变压器场;13—开关站;14—开关室;15—主厂房;16—交通通风洞;17—进厂交通洞

大坝为变圆心、变半径双曲拱坝,坝顶高程294 m,坝顶弧长438 m,坝顶宽7 m,最大底宽(厚)35 m,厚高比0.223,最大圆弧半径309.3 m,最大中心角95°。右岸270 m高程以上设置重力墩。潜孔滑雪式溢洪道布置在坝体两侧,右岸2孔,左岸1孔。进口底坎高程266 m,孔口尺寸10 m×7.5 m(宽×高),总泄量4416 m³/s。滑雪槽采用钢筋混凝土排架结构。右岸溢洪道尾部采用窄缝式挑坎;左岸溢洪道尾部采用扭曲挑坎消能。一级洞布置在左岸,用作水库放空兼泄洪,有压段洞径10 m,无压段断面尺寸为8.5 m×12 m,进口底坎高程222 m,最大泄量2000 m³/s。二级洞布置在右岸,用作水库放空、后期导流及下闸蓄水期间向下游供水,有压段洞径8.9 m,无压段断面尺寸7.2 m×12 m,进口底坎高程170 m,最大泄量1625 m³/s,装设偏心铰弧形闸门控制。

主厂房位于坝后,长106 m,宽23 m,高56 m。

厂内安装4台机组,单机容量125 MW。水轮机为混流式,转轮直径4.1 m,额定转速166.7 r/min。发电机为伞式空冷型,额定容量147.06 MV·A,额定功率因数0.85,额定电压13.8 kV。4条直径5.2 m的引水钢管斜穿坝身,附于下游坝面,管外包以钢筋混凝土。厂坝之间布置有副厂房、4台容量为150 MV·A的主变压器、220 kV气体绝缘金属封闭电器室等。

库内坝上游5.5 km处的长盈头的木材集运场,设计年集运木材30万m³,采用汽车运输。

工程施工 设计主要工程量为:土石方开挖118万m³,混凝土浇筑153万m³,帷幕灌浆4.5万m,固结灌浆4.2万m,钢筋钢材2.3万t。施工导流,初期采用枯水期隧洞导流、汛期围堰过水方式;后期采用导流洞与放空洞导流、坝身不过水的导流方式。场外交通采用专用铁路与公路运输。

设计和施工单位 中南勘测设计院设计,水利电力部第八工程局施工。

(王华阳)

dong kurong

动库容 (dynamic storage volume of reservoir)

水库回水水面与坝前水位水平面之间的楔形水库容积。坝前水位水平面以下的水库容积叫静库容。动库容一般集中在水库变动回水区。地形开阔、河道比降较小的水库,动库容相对较大。入库流量愈大,水库末端回水水面上翘愈高,动库容愈大。因此,当库区发生洪水时,动库容更为明显。其变化可用下式表示

$$dV = \frac{\partial V}{\partial Q} dQ + \frac{\partial V}{\partial Z} dZ \quad (1)$$

式中 V 为库容, m³; Q 为库区来水流量, m³/s; Z 为水库水位, m。

动库容对调洪的影响 根据一些大型水库实测成果表明,考虑动库容调洪,比不考虑动库容,调洪的成果更接近实际。因此,中国水利电力部1977年颁布的《水利水电工程水利动能设计规范(试行)》规定:

“对于重要的水库,当库尾比较开阔,动库

容数值占调洪库容的比重较大时,应研究动库容对调洪的影响。”考虑动库容调洪与不考虑动库容调洪的结果相比,其蓄洪水位有高有低,这主要同水库地形、泄洪设施以及洪水过程等因素有关。

水库洪水是不恒定流,可用圣维南(De Saint Ve-

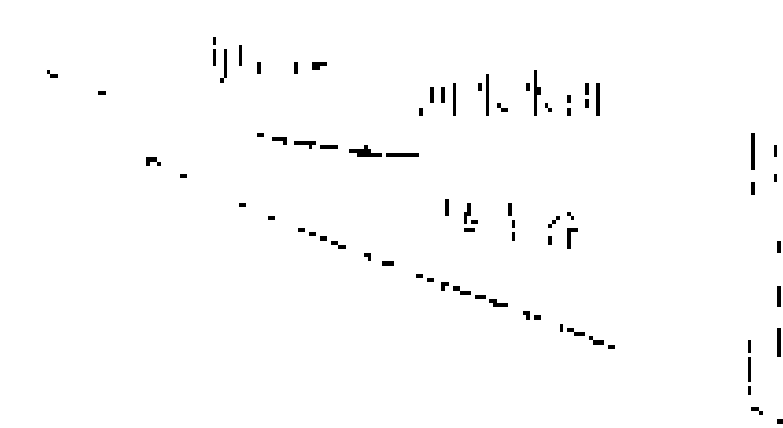


图1 水库动库容简图

dong 洞

nant) 方程组 (见洪水调节) 来描述。若将水库整个容积分河段计算, 工作量较大, 故常采用简化法, 即将水库入库流量化为一等价恒定流量 Q' 进行调洪计算。调洪过程中, 坝前水位经常变化, 入库流量不一定等于出库流量。因此, 坝前同一水位介于入库流量 Q 和出库流量 q 在恒定流时的两条水面线之间, 即实际的动库容介乎这两者之间。若假定一个库区入库流量 Q' 所形成的动库容与上述形成的实际动库容基本一致, 则等价入库流量可用下式表示

$$Q' = q + x_Q(Q - q) \tag{2}$$

式中 x_Q 为与出、入库流量有关的权重系数, 变化范围在 0~0.5 之间。假定不同的 q 、 Q 、 Q' 计算回水求动库容, 即通过试算使两动库容基本相同来确定 x_Q 。

考虑动库容的调洪计算 考虑动库容进行调洪计算, 先要绘制考虑动库容的容积曲线和调洪工作曲线。

(1) 考虑动库容的容积曲线的绘制。它是通过回水

计算求得, 其形式是以水库入库流量 (一般用等价流量 Q' 替代) 为参数的库水位与容积的关系曲线 (见图 2)。图 2 表明当 Q' 值增加时, 动库容也随之增加。

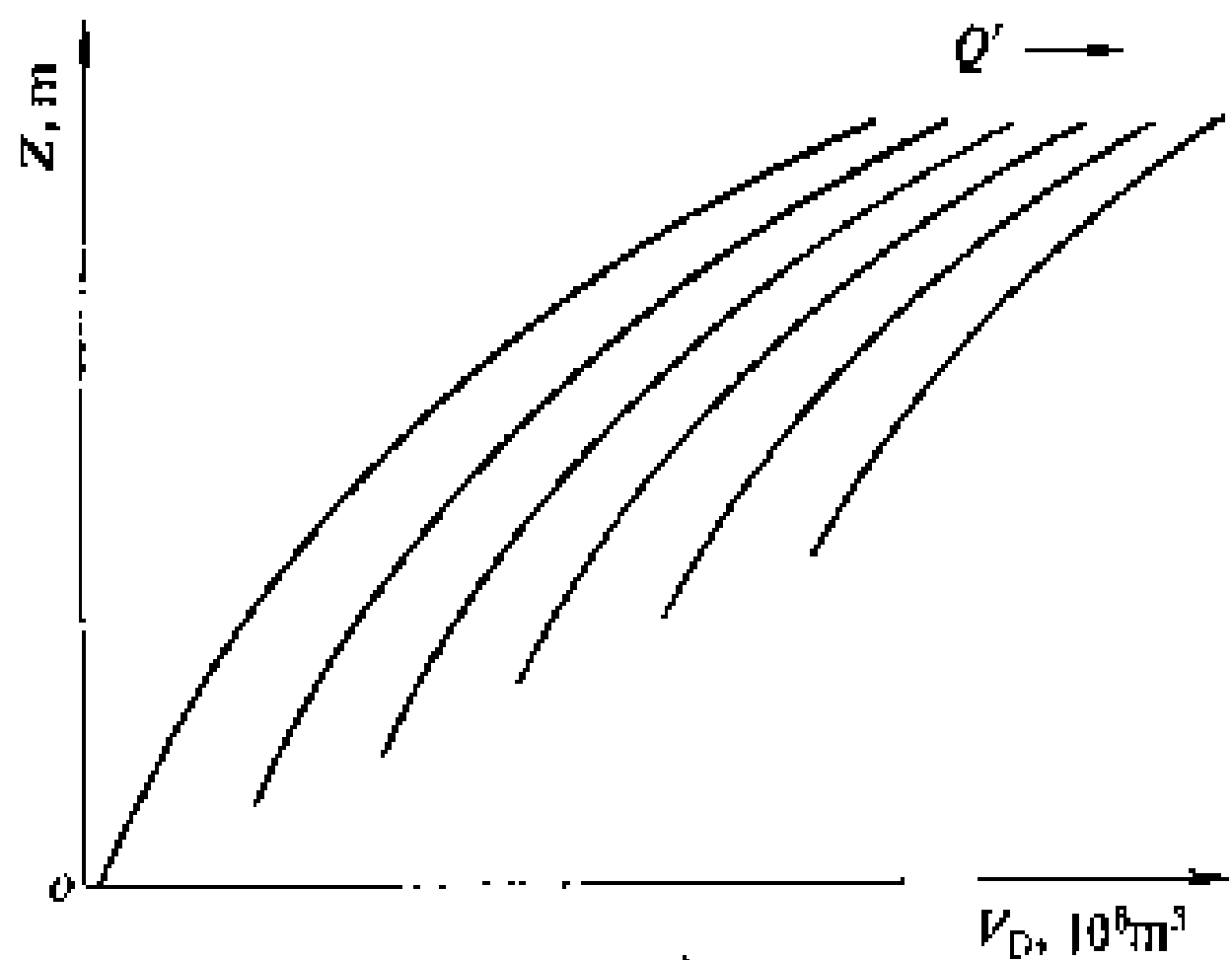


图 2 考虑动库容的水库容积曲线

(2) 调洪工作曲线的绘制。已知 x_Q , 可按下表求得以入库流量为参数的调洪工作曲线。

考虑动库容调洪工作曲线计算表

坝前水位 Z (m)	出库流量 q (m^3/s)	入库流量 Q (m^3/s)	等同流量 Q' (m^3/s)	库 容 V_D ($10^6 m^3$)	$V_D/\Delta t$	$q/2 + V_D/\Delta t$	备 注
670	800	1600	1040	1160	107410	107810	V_D 为考虑动库容的水库容积, $\Delta t = 3h$, $x_Q = 0.3$
		2000	1160	1380	127780	128180	
		
671	1200	1600	1320	1430	132410	133010	
		

注: 表列计算作为示例, 数值是假定的。

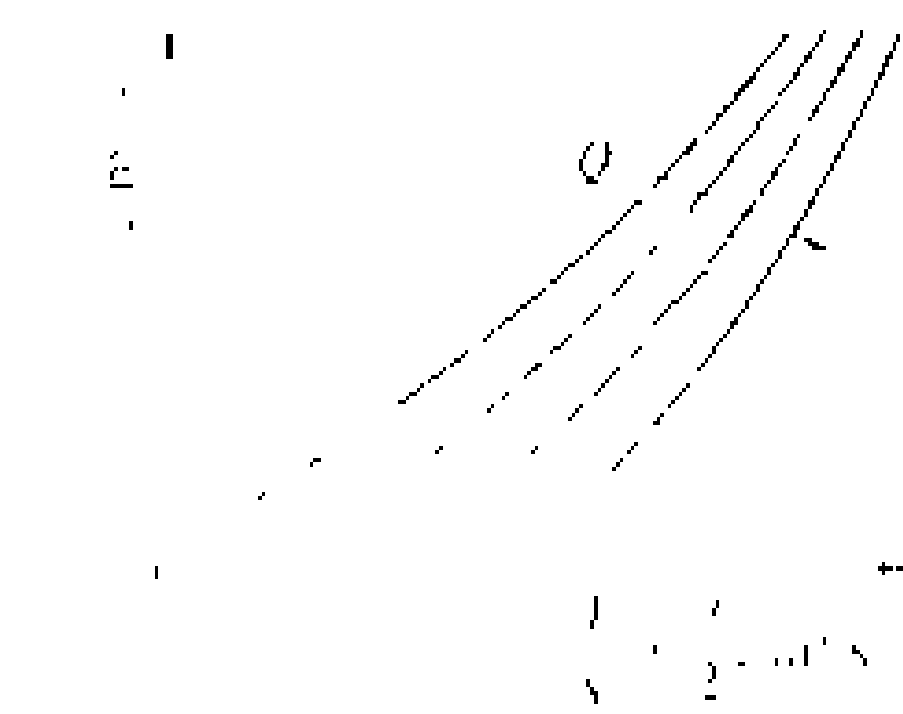


图 3 考虑动库容的调洪工作曲线

据上表以 Q 为参数, 点绘 q 与 $(V_D/\Delta t + q/2)$ 的关系即得 (见图 3)。

(3) 调洪计算。方法与静库容调洪计算基本相同 (见洪水调节), 只是工作曲线不同而已。

参考书目

华东水利学院叶秉如主编, 水利计算, 北京: 水利电力出版社, 1985

(许自达)

dongshi baopo

洞室爆破 (chamber blasting) 将炸药按设计要求装填在专门挖掘的洞穴内起爆的爆破技术。洞室爆破适用于大量土石方开采、定向爆破筑坝、大量矿山剥离、露天采矿、路基开挖、农田改造、航道疏浚等大爆破作业, 具有效率高、投资省、进度快、所需机械设备简单、不受自然条件限制等优点, 是各项基本建

设土石方工程广为采用的施工方法。但洞室爆破一次起爆的药量大, 对保留岩体的破坏也较大, 因此使用时必须十分谨慎。

洞室爆破可根据工程需要采用松动爆破或抛掷爆破。炸药用量一般采用单药包爆破药量的经验公式, 根据要求按爆破每立方米岩石的单位耗药量和最小抵抗线长 (即自药包中心至被爆岩体表层的最短距离) 计算。洞室爆破要预先开挖药室洞穴和进入药室的导洞。药室数量、位置和洞穴形状、大小根据地形、地质条件和工程设计要求确定, 一般采用集中药包。在爆区地形多面临空或限于周围建筑物条件的情况下, 也有采用条形药包的。进入药室的导洞可用平洞、斜井或竖井, 断面尺寸根据施工要求决定。中国 GB6722-86《爆破安全规程》规定平洞尺寸不宜小于 0.8 m×1.5 m (宽×高), 竖井断面积不小于 1 m², 并在洞口或井口附近设置临时堆放炸药的场地。在装填炸药过程中, 需用 36 V 以下低压电源照明。在安置起爆药包时, 切断一切电源, 使用矿用蓄电池灯或安全手电筒照明。用复式起爆网络 (即两组电爆网络或一组电爆网络与另一组导爆索或导爆管网络) 起爆。导洞用土石等当地材料堵

塞,堵塞长度一般不小于 1.2 倍最小抵抗线长。

(王守道)

duanlu dianliu.

短路电流 (short circuit current) 电路中由于故障而造成短路时的电流。短路是电力系统正常运行情况以外的一切相与相之间或相与地之间通过电弧或其他较小阻抗的一种非正常连接。

短路电流的类型 三相电力系统中短路电流的基本类型为:①三相短路电流;②两相短路电流;③单相接地短路电流;④两相接地短路电流。

电力系统的运行经验表明,发生各种短路的概率是不同的,其中以有效接地系统的单相接地短路较多。据 1984 年中国继电保护和安全自动装置动作及有关故障分析结果,中国 220 kV 和 330 kV 线路故障统计数据为:单相接地故障占 85.37%,两相接地故障占 3.28%,两相短路占 2.69%,三相短路占 2.69%,发展性故障、断线不接地故障和未查明故障共占 5.97%,这些统计数据有一定代表性。

三相短路时三相电流和电压同正常情况一样相差 120°,是对称的短路电流。其他类型短路电流则是不对称短路,一般都用对称分量的原理(见电力系统卷对称分量法)将任何不对称短路的一个不平衡的三相系统分解成三相对称系统,故三相短路电流的计算和分析,是研究各种类型短路电流的基础。

短路电流的效应 发生短路时,电力系统的总阻抗减小。因而伴随短路所发生的基本现象是:电流剧烈增加,例如发电机出线端三相短路时,电流的最大瞬时值可高达发电机额定电流的 10~15 倍,大型机组绝对值最大达几十万安培。这样大的电流所产生的热效应和力效应会使电气设备受到严重威胁。同时系统中的电压也将大幅度下降,例如系统发生三相短路时,短路点的电压将降到零,短路点附近的电压也将明显降低,可能导致电动机停转,以致造成产品报废及设备损坏等严重后果,也可能使并列运行的发电厂失去同步,破坏系统稳定,使整个电力系统的正常运行遭到破坏,引起大片地区停电,这是短路故障最严重的后果。另外,不对称接地短路所造成的不平衡电流,将产生零序不平衡磁通,会在邻近的平行线路(例如通信线路、铁道信号系统等)内感应出很大的电动势,这将造成对通信的干扰,并危及设备和人身的安全。

由上述可见,短路电流已成为电力技术方面的基本问题之一。在发电厂、变电所以及整个电力系统的设计和运行的许多工作中,都必须有短路电流计算的结果作依据,用以解决:①电气主接线方案的比较和选择;②电气设备和载流导体的选择;③继电保护的方案

选择和整定;④确定限制短路电流的措施;⑤接地装置的设计等。

短路电流的计算 一个电力系统包含许多发电厂、变电所、线路和负荷,而且短路过程又是一个比较复杂的过渡过程,不仅有电磁方面的过渡过程,而且还有机械方面及热方面的过渡过程。所以,要准确地计算短路电流是很复杂的,有时甚至是不可能的。另外,在许多情况下这样做也没有必要。因此,通常是在满足工程要求的情况下,采取一些合理的假设,以便略去次要因素,突出主要矛盾,简化计算分析。(见电力系统卷短路电流计算)

国际电工委员会(IEC)于 1971 年专门成立短路电流技术委员会(TC73),主要任务是制订和向国际推荐关于三相电力系统短路电流的计算和短路电流引起的热、力效应计算的标准。经十余年的努力,已于 1986 年提出了《短路电流效应的计算》和《三相交流系统短路计算》两个标准草案送审。日本、联邦德国、英国、苏联等国也制订有短路电流计算法。中国于 1980 年 12 月也试行《短路电流实用计算法》,根据一些假设和国产机组参数,并按中国电力系统负荷分配的实际情况,用概率统计的方法制订出短路电流运算曲线。

从 IEC 和联邦德国制订的计算方法来看,都用了如下计算假设条件:①不计发生故障后系统各发电机的摇摆,并假定系统中各电源的电动势相位相同。②不计各发电机间的电磁过渡过程。③略去系统的负荷、线路电容等并联元件对短路电流的影响。④对于在发电机近处短路,假定发电机处于额定运行状态,求得发电机的次暂态电动势直轴分量的幅值,并以此作为发电机的电动势,进行短路电流初瞬值的计算。⑤不考虑参数的非线性特性,在计算中允许应用叠加原理。⑥故障点没有任何阻抗,即发生金属性短路。

另外,根据几十年来在交流电机的过渡过程方面的研究,应用派克方程(见电力系统卷派克方程)可计算任意时间短路电流周期分量的有效值。但对于工程计算,仍太繁琐,可应用查事先制成的计算曲线的方法来算,既可满足工程需要,也可减小计算工作量。

短路电流计算的目的是要求是不同的,如在选择电气设备时要计算最大可能出现的短路电流,以保证设备的可靠性。而在进行继电保护的整定计算时还要计算可能出现的最小短路电流,以验算继电保护灵敏性和保证能及时切除短路故障。前者一般按水电站本期工程全部机组投产后,电力系统 5~10 年内的电力工业发展规划水平和可能发生最大短路电流的正常接线方式进行短路电流计算,因而它的计算值不要求很准确,故一般可用运算曲线法或交直流模拟台计算。当需精确计算时,则可利用电子计算机计算。随着计算机

duan 断

的日益普及，有用计算机进行较精确的短路电流计算的发展趋势。

参考书目

西安交通大学等，短路电流实用计算方法，北京：电力工业出版社，1982

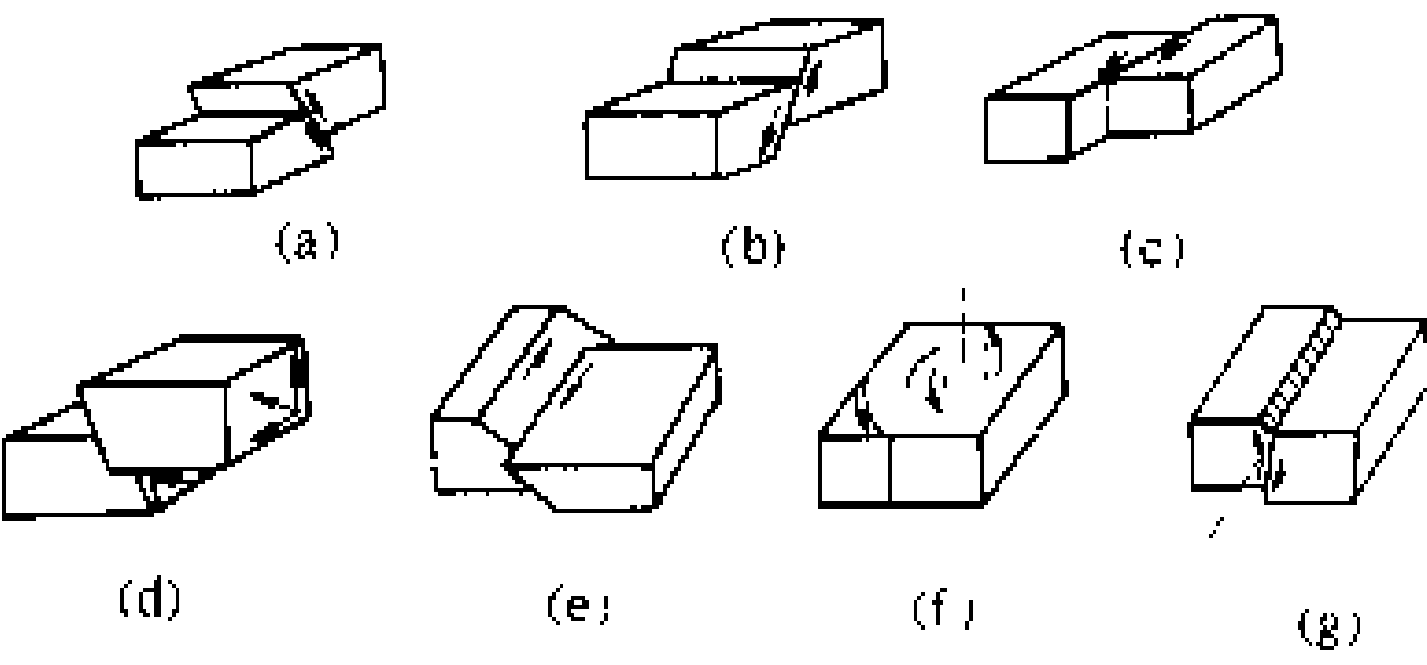
(潘天缘)

duanceng

断层 (fault) 沿岩层在构造应力作用下的破裂面产生的相对错动带。岩层或岩体在区域地质构造应力作用下，当构造应力超过岩石的极限强度，导致岩石破裂，两侧岩层发生相对错动。主要错动面及其间经挤压错动而破碎的物质称断层破碎带。断层破碎带两侧一定宽度范围内，岩层仍较破碎，称为断层影响带。

断层要素 包括断层面、断盘、断层线、断层产状和断距。断裂错动面称断层面；断层两侧岩层称断盘，断层面以上的一侧称上盘，以下一侧称下盘；断层面在地面的出露线称断层线；断层面的走向、倾向和倾角三要素称断层产状；沿断层两侧岩层相对错动的距离称断距。

断层分类 按断层两侧相对错动方向，可以把断层分为五类（见图）：①逆断层是上盘沿断层面相对向上错动，下盘相对向下错动的断层。断层面倾角小于30°称逆掩断层，倾角大于30°称逆断层。②正断层是上盘沿断层面相对向下错动，下盘相对向上错动的断层。断层面倾角多大于50°。③平移断层是两盘沿断层面作相对水平位移的断层。断层面常近于直立。④平移正、逆断层是两盘沿断层面兼具上下和水平位移的斜向错动断层。⑤旋转断层是断盘绕铅直轴或水平轴旋转位移的断层。



断层分类示意图

(a) 逆断层；(b) 正断层；(c) 平移断层；(d) 平移逆断层；(e) 平移正断层；(f) 沿铅直轴的旋转断层；(g) 沿水平轴的旋转断层

断层的工程地质性质 ①逆断层面呈舒缓波状，有时有镜面，挤压面常集中出现构成挤压带，断层面矿物定向排列，抗剪强度低，常具有隔水性能。②正断层面粗糙，有时呈锯齿状，抗剪强度较逆断层高，透水排水性能好，常为地下水的通道，在石灰岩地区容易沿其

形成喀斯特洞穴。③平移断层面平直光滑，有镜面，产状稳定，倾角一般较陡，延伸长，在平面上常成X形分布，抗剪强度亦较低。

(朱建业)

duanlie lixue

断裂力学 (fracture mechanics) 研究固体中裂纹扩展和传播规律的学科，是力学的一个新分支。裂纹是固体的一种宏观缺陷。断裂力学认为裂纹在一定外力和环境因素的作用下会扩展，从而导致物体的破坏。断裂力学在科学史上第一次把缺陷的尺寸和物体破坏的规律定量地联系起来，这是固体力学的一个突破性进展。断裂力学主要内容为：①线性弹性断裂静力学，研究弹性材料中断裂事件的起始；②非线性断裂力学，研究材料非线性效应对断裂事件的影响，也称为弹塑性断裂力学；③断裂动力学，考虑惯性效应对断裂事件的影响。

断裂力学以连续介质力学理论为基础，把裂纹作为一种边界条件，计算出各种控制断裂事件的参量，例如应力强度因子 K ，裂纹张开位移 δ 和 J 积分等等，并且由实验测得 K ， δ 和 J 的临界值 K_c ， δ_c 和 J_c ，以 $K=K_c$ ， $\delta=\delta_c$ 和 $J=J_c$ 为断裂判据， K （ δ ， J ）与外应力 σ 和裂纹尺寸 a 有关， K_c （ δ_c ， J_c ）为材料常数。

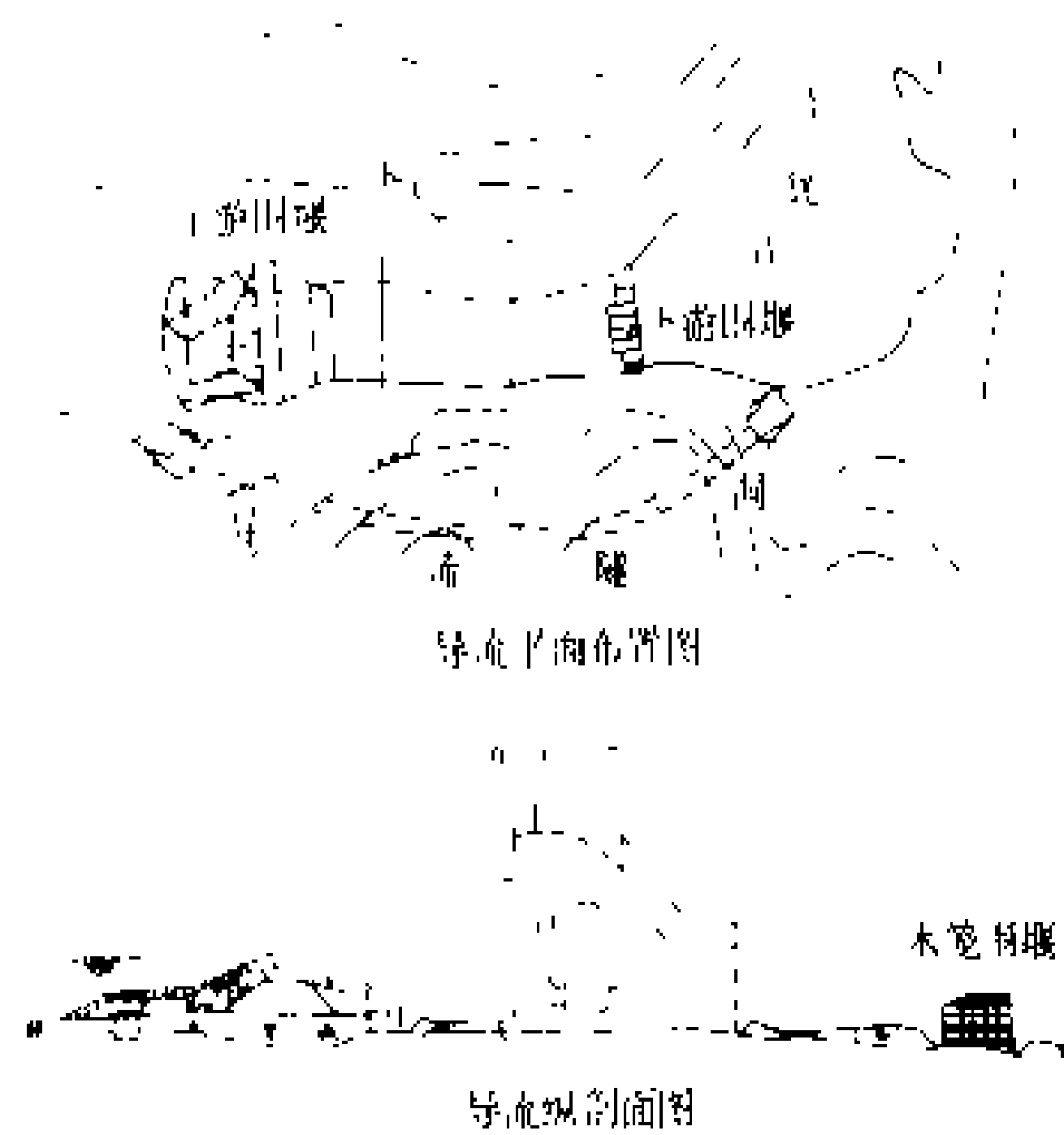
连续介质力学的断裂理论从1920年A. A. 格里菲思（A. A. Griffith）所做的工作开始萌芽。1957年G. R. 欧文（G. R. Irwin）提出应力强度因子概念，很快建立起了线性弹性断裂力学的理论体系。此后，发展迅速，现已在疲劳、应力腐蚀等问题中得到应用，为工程结构的强度设计和断裂控制提供了理论依据。

(范天佑)

duanliu weiyao daoliu

断流围堰导流 (river closure diversion; complete diversion) 在河道上修建水工建筑物时，用临时挡水建筑物横河拦断水流，迫使河水改道下泄的施工导流方式。一般是在拟建的主体工程上游及下游，各设置一道横跨河床的围堰拦断水流，利用围出的与水流隔绝的封闭河段，做为施工场地，通称基坑。河水通过基坑外预先建成的隧洞、明渠或基坑内的涵洞（管）等导流泄水建筑物下泄。导流工程一般要求导流泄水建筑物先具备运用条件，河床才能截流、围堰才能闭气加高（见截流），然后排除基坑积水，为主体工程创造出陆地施工条件。这种导流方式多适用于窄河床，或主体建筑物要求整体平起施工的工程，例如上坝、拱坝等。中国江西省上犹江水电站，为坝内厂房。采用断流围堰、隧洞导流，见图。

断流围堰导流方式有全年基坑断流及枯水期基坑断流两种方式。



中国江西省上犹江水电站施工导流布置图

(1)全年基坑断流方式。其导流建筑物按全年设计频率的导流流量及相应水位设计。主体工程在围堰的保护下进行全年连续施工,直至建成。采用这种导流方式要预计发生超标准洪水时工程的损失并安排好防洪应急措施。对于土坝等不允许施工期间坝体过水的工程及拱坝等要求整体平起施工、整体挡水的工程,一般均应按全年基坑断流方式设计。全年断流方式有主体工程能够全面施工,施工程序连贯,施工场地和附属设施布置紧凑,生产效率高,施工管理方便等优点。但对于大流量的河道,如采用这种导流方式,其导流建筑物特别是导流泄水建筑物规模较大,导流费用高,导流工程自身的施工工期长,施工难度较大。

(2)枯水期基坑断流方式。其导流建筑物按枯水时段设计频率的导流流量及相应水位设计。围堰保护主体工程在枯水期内全面施工。这种导流方式的特点是导流工程规模小、费用低、下基坑早等,但主体工程施工条件较差,基坑交通及机械布置等受洪水影响,造成工期紧张,施工强度加大。

枯水期基坑围堰的结构可设计为过水与不过水两种型式。过水围堰主要用于枯水期流量与洪水期流量的比值(枯洪比)悬殊的河道,且主体工程一个枯水期又不能抢筑出脱险水位的情况。堰体设计为施工期间允许过水而不被破坏的结构。过堰水流需通过主体工

程中设置的底孔、涵洞(管)、坝体缺口或梳齿等泄水通道下泄。主体工程不过水部位汛期仍可继续施工。汛后水位下落,围堰能再度挡水,基坑经排水、清污后恢复全面施工。采用不过水围堰,要求主体工程在一个枯水期内抢修至一定挡水高度,汛期围堰翻水被冲毁后,由主体工程挡水不再依靠围堰,否则只有汛后再重修围堰。枯水期断流方式多适用于枯水期较长的河流上修建中、小型工程或混凝土建筑物。

(陈勉芳)

duanmian celiang

断面测量 (section survey) 在选定的两端点之间,沿直线方向确定地面变换点、地物的位置和高程的测量工作。测量成果按要求的纵、横比例尺绘制成断面图,其顺河或沿线路方向的中心直线或折线施测的断面,称为纵断面或纵剖面;垂直河道或线路方向施测的断面,称为横断面或横剖面。

纵断面测量 一般在两个横断面间加测一定密度的河道中泓点或地形变换点。因纵断面图的横向比例尺较小,间距可从大于或同比例尺的地形图上量取,河流深度或线路中心点高程可在各自的横断面上获取或实地测量。

纵断面图上除上述主要内容外,还应包括转折点的桩号,建筑物的位置和名称。对于河流纵断面图还应有河流左右岸居民地、厂矿企业名称、两岸地面最高与最低点高程、支流名称及入口位置、河底高程、水文站水尺位置及高程、工作水位和同时水位、横断面位置及编号、河段地形图名称和编号等。

横断面测量 应根据设计要求实地选定断面位置,端点用标石或木桩固定,按一定规则或里程编定断面点号,横断面测量可采用经纬仪视距法、水准仪量距(或视距)法和其他方法进行。

横断面图内容主要包括图名、水平与竖向比例尺、高程系统、地表线和地表性质、中心线桩编号和地面高程等。在同一张图上绘制几个横断面时,要按桩号顺序使中心桩位置位于同一垂线上。

参考书目

李清云. 工程测量学. 北京: 测绘出版社, 1990

(茅玉清)



Ertan Shuidianzhan

二滩水电站 (Ertan Hydropower Station)

位于金沙江最大支流雅砻江的下游、四川省米易县和盐边县接壤处。距攀枝花钢铁基地约 40 km，距成昆铁路桐子林车站 18 km。电站以发电为主，兼有过木等综合利用效益。装机容量 3300 MW，保证出力 1000 MW，年发电量 170.35 亿 kW·h，以 4 回 500 kV 输电线路接入四川电力系统。混凝土双曲拱坝，最大坝高 240 m。水库淹没耕地 24841 亩，迁移人口 21917 人。工程于 1991 年开工，计划 1998 年发电。

20600 m³/s，相应库水位 1200 m。五千年一遇校核洪水流量 23900 m³/s，相应库水位 1203.5 m，总库容 61.8 亿 m³。正常蓄水位 1200 m，相应库容 58 亿 m³。死水位 1155 m，调节库容 33.7 亿 m³，属季调节水库。电站设计水头 165 m，最大水头 189 m，最小水头 135 m。

枢纽布置 坝址由二叠系玄武岩和后期侵入的正长岩组成，岩体坚硬完整。坝址区地震基本烈度 7 度，设计烈度 8 度。枢纽由大坝，右岸泄洪隧洞，左岸引水发电系统，地下式厂房以及纵向过木机道等建筑物组成，见图。

大坝为抛物线型双曲拱坝，坝顶高程 1205 m，坝顶弧长 774.7 m，坝顶宽 11 m，最大坝底厚 55.7 m，宽高比 0.232，弧(长)高比 3.23，最大中心角 91.49°。

共有 3 套泄洪设施。坝上表孔溢洪道(泄洪孔 7 孔，孔口尺寸为 11 m×11.5 m)，坝体中孔溢洪道(6 孔，孔口尺寸为 6 m×5 m)和右岸龙抬头泄洪隧洞(2 条，浅水式、短进水口，断面尺寸为 13 m×15 m)。3 套泄洪设施的流量分配见表。

由表中可见，在常年洪水 1200m 水位时，3 套泄流

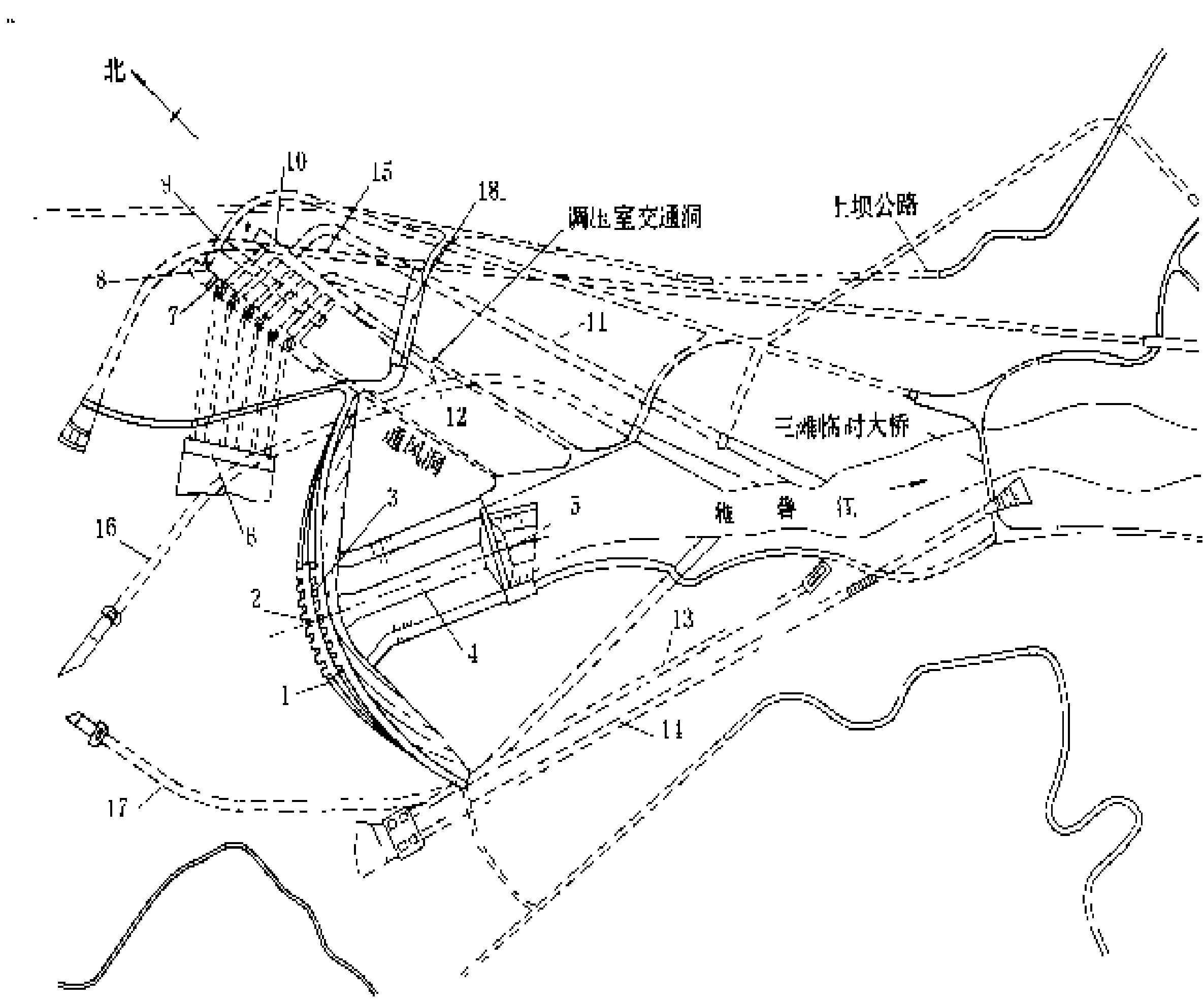
设施能力基本相等，与机组过流相结合，每套泄洪设施均能单独宣泄常年洪水流量，具有互为备用的功能。

消能设计中采用坝顶溢流表孔大差动跌坎加分流齿，压力上翘型中孔，表、中孔双层多孔水舌空中碰撞、混搅，并在坝下设置水垫塘，塘后有二道坝。右岸布置泄洪洞。

左岸引水、尾水系统包括：塔式进水口、6 条直径为 9 m 的压力管道及尾水调压室、2 条断面尺寸为 16.5 m×16.5 m 的尾水隧洞。地下式厂房，长 280.3 m，宽 25.5 m，高 65.7 m。厂内安装 6 台单机容量为 550 MW 的混流式水轮发电机组。地下主变压器室设 6 台容量为

620 MV·A 的 500 kV 三相升压变压器。500 kV 屋外开关站布置在左岸坝肩下游。

纵向过木机道总长 2505 m，隧洞宽 15 m，高 7 m，



二滩水电站枢纽平面布置图

- 1- 拱坝；2 表孔溢洪道；3 中孔；4 水垫塘；5 二道坝；6 电站进水口；7 厂房；8 安装间；9 主变压器室；10 尾水调压室；11 1号尾水洞；12 2号尾水洞；13 1号泄洪洞；14 2号泄洪洞；15 过木机道；16 左岸导流隧洞；17 右岸导流隧洞；18 500 kV 开关站

水文和水库特性 坝址以上流域面积 116400 km²，占全流域的 90%。多年平均流量 1640 m³/s，多年平均年径流量 517 亿 m³。千年一遇设计洪水流量

二滩水电站泄洪建筑物流量分配表

设计标准	上游水位 (m)	泄 洪 流 量 (m³)				总泄量 (m³/s)
		表 孔	中 孔	泄洪洞	机 组	
0.02%	1203.5	9600	6700	7600		23900
0.1%	1200.0	6600	6600	7400		20600
常年洪水 50%~33%	1200.0	6600			1500	8100
			6600		1500	8100
				7400	1500	8900

长 2394 m，装有 3 台纵向联合运输机。

工程施工 设计总工程量为：土石方明挖 800.6 万 m³，石方洞挖 324.3 万 m³，混凝土浇筑 674.4 万 m³，土石方填筑 113.2 万 m³，帷幕灌浆 23.4 万 m，固结灌浆 18 万 m，钢筋、钢材 5.1 万 t，金属结构安装 2.5 万 t。枢纽工程施工导流采用左、右岸导流隧洞和断流上石围堰的全年导流方式。场内交通采用公路运输。

设计和建设单位 成都勘测设计院设计，业主为二滩水电开发公司。
(赵增凯)



F

fadianji - bianyaoqizhu jiaxian

发电机-变压器组接线 (generator - transformer block scheme) 发电机和变压器串联连接的电路。常用的接线方式有单元接线、扩大单元接线以及联合单元接线。

发电机-变压器单元接线 一台机组接一台主变压器(双绕组或三绕组或自耦变压器),见图(a)。优点是:①发电机与主变压器容量协同,接线简单清晰,元件故障影响范围小,运行可靠,操作简单。②发电机电压设备元件少,布置简单方便,维护工作量小。③继电保护简单。缺点是:①主变压器和高压断路器数量较扩大单元接线多,对简化高压侧接线不利,增加布置场地和设备投资。②主变压器故障时影响机组送电。③当采用三绕组或自耦主变压器时,发电机出口要求装设断路器。④当电站需要从电力系统倒送厂用电且接有公共厂用变压器,或开停机频繁的调峰电站,需要减少高压侧断路器操作次数的单元回路,或是高压侧采用内桥形接线(见桥形接线)或角形接线、一个半断路器接线、三分之四断路器接线的调峰电站,也要求在发电机出口装设断路器。

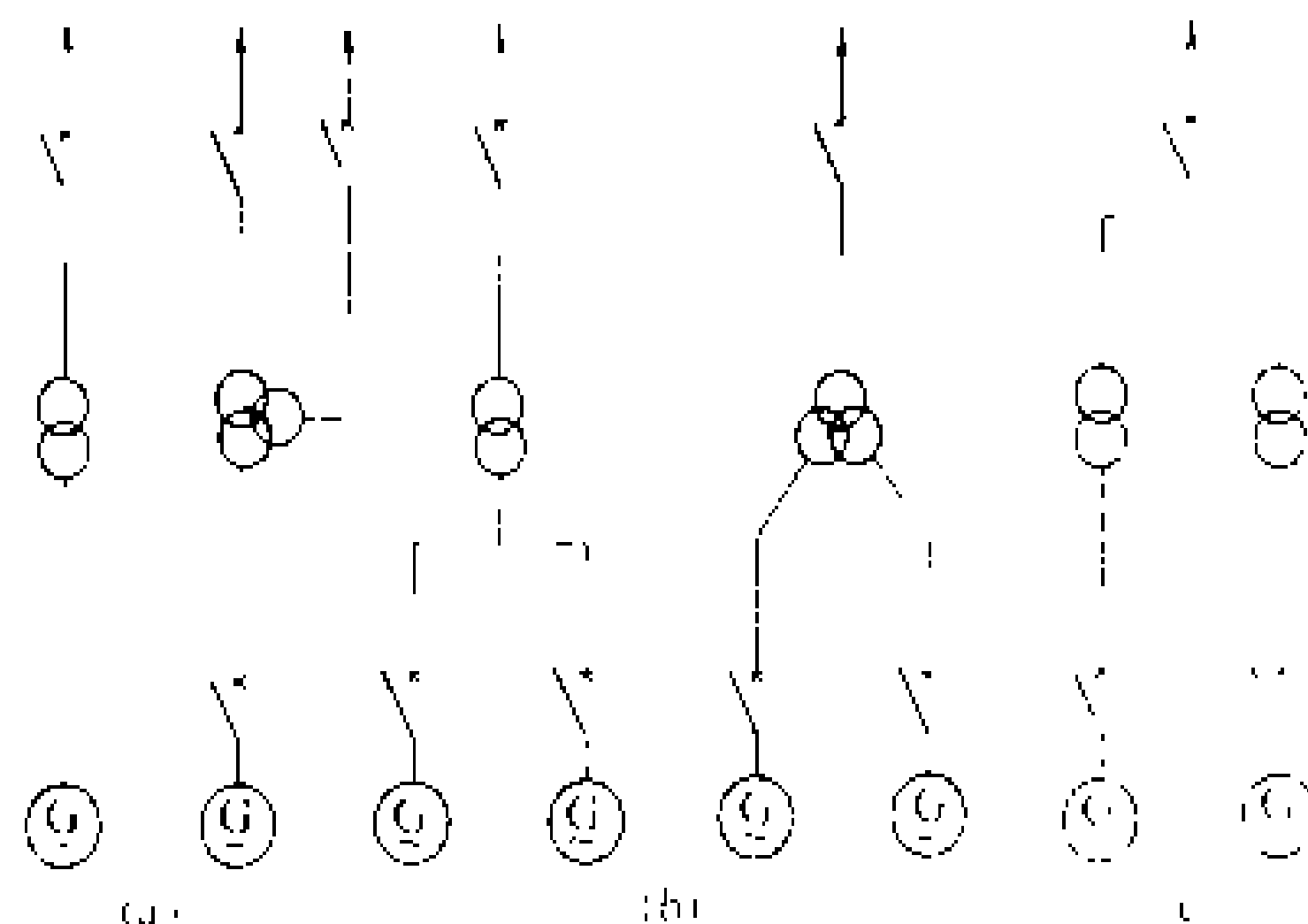
这种接线一般适用于单机容量在 100 MW 及以上的大容量机组。当单机容量小于 100 MW,经方案比较,采用其他接线方式不合适时,也可采用单元接线。

发电机-变压器扩大单元接线 两台或两台以上机组接一台主变压器,见图(b)。优点是:①接线简单清晰,运行维护方便。②主变压器台数及其相应的高压开关设备比单元接线少,有利于简化高压侧接线,可缩小布置场地和节约投资。③任一台机组停电,不影响接在主变压器低压侧的厂用电源供电,即使本单元全部机组停机,仍可继续由电力系统经主变压器倒送,提高了厂用电供电的可靠性。缺点是:①主变压器故障或检修时,两台或两台以上机组容量不能送出。②变压器单台容量大,易受制造和运输的限制。③增加发电机电压断路器和增大发电机电压侧短路容量。为限制短路容量,变压器低压侧可用分裂绕组变压器,但其价格较普

通型变压器贵。

这种接线适用范围较广,大、中、小型电站均有采用。扩大单元的主变压器容量要与电力系统的总容量和备用容量相适应,一般不大于系统总装机容量的 10%,并要满足主变压器故障时系统稳定运行的要求。另外,当水电站仅有一个扩大单元时,要注意避免在变压器回路故障或检修时造成大量弃水和影响下游供水等。

发电机-变压器联合单元接线 两组或两组以上单元接线在高压侧的联合,见图(c)。优点是:①机组与主变压器台数相同,但节省了高压断路器,并减少了主变压器至开关站的进线回路数,有利于进线布置和简化高压侧接线。②与单元接线比较,机组停机可较方便地由主变压器倒送厂用电源。③与扩大单元接线比较,不致因主变压器故障或检修而较长时间地影响本单元全部机组容量送出。缺点是:①主变压器高压侧有并联母线和隔离开关,不仅增加布置面积,对变压器场地布置也带来一定困难。并联母线或高压断路器故障,影响本单元全部机组容量送出。②任一台主变压器故障或检修,接在本单元的全部机组需短时停机。③一台机组停机可断开发电机电压断路器,但主变压器仍带电,增加空载损耗。



发电机-变压器组接线方式简图

(a) 单元接线; (b) 扩大单元接线;

(c) 联合单元接线

这种接线适用于大机组、大型电站,也适用于变压器场地布置条件允许,但电站为分期建设且过渡时间较长,因而采用联合单元接线较扩大单元接线有利的场合。另外,由于设备制造或运输条件限制等原因,采用扩大单元接线需用单相变压器或组合式三相变压器,而联合单元接线可用普通型三相变压器,通过技术经济比较证明有利时也可采用,如中国柘溪水电站(单机容量 75MW)即由于此原因将最后安装的两台机组采用联合单元接线。

(潘天缘)

fadianjiceng

发电机层（generator floor）水电站主厂房中最上一层楼层。发电机层以上的建筑一般也可称为机房。发电机层的中部为机组，机组周围一般布置有水轮机调速器、压油装置、操作柜，楼层的上、下游墙侧部位布置有电气表盘以及通往下层的楼梯间。为了下层设备的吊运，楼板上还设有吊物孔。楼板为钢筋混凝土结构，其地面要求坚固耐磨、耐腐蚀、清洁美观，常采用水磨石。

与发电机高度相对应，发电机层楼板有几种布置型式：①发电机定子全部露置于发电机层楼板以上。②发电机的上机架，或只有上机架以上的励磁机、轴承机构部分，露出于发电机层楼板以上，定子都落在楼板下面，发电机的上盖板与楼板齐平，机房显得较宽敞，许多大中型水电站采取这种布置。③发电机全部落在发电机层楼板以下。④主厂房一侧有发电机层楼板，另一侧无楼板，发电机布置呈“半岛”式。⑤没有发电机层，如横轴机组的发电机及水轮机都安装在水轮机层内。

有的厂房发电机层楼板高程与安装间地面高程相同，有利于安装间面积的利用，也有的采用不同高程。发电机层以上没有上部建筑的为露天式厂房（见主厂房），它受外界气候影响很大，安装、检修运行、维护均不方便，只有个别水电站采用此种型式。

（李必如）

fadianji dianyao jianxian

发电机电压侧接线（electrical connection on generator voltage side）发电机与发电机电压电气设备和变压器连接的电路。表明发电机、断路器、导体（母线或电缆）、变压器等主要电气设备的连接方式。常用的接线有发电机电压单母线接线、发电机电压单母线隔离开关分段接线、发电机电压单母线断路器分段接线以及发电机-变压器组接线。

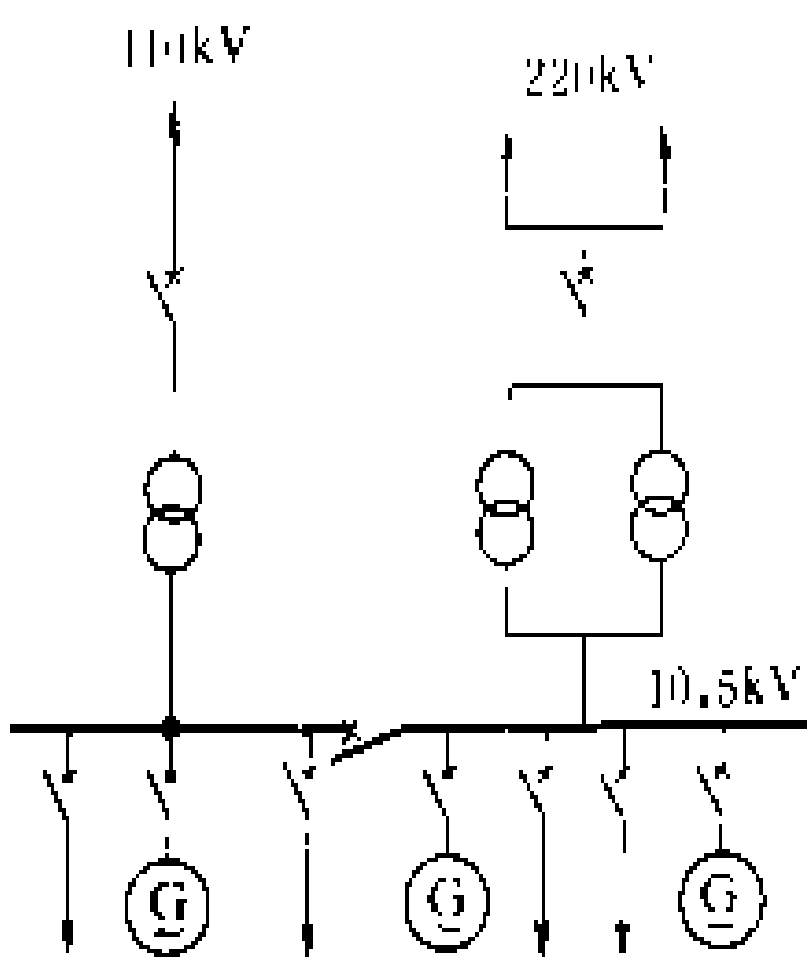
发电机电压单母线接线 发电机功率的汇集和分配由一条汇流母线来完成。优点是：①接线简单清晰，运行方便。②配电装置便于扩建。③主变压器台数和发电机台数可不一致，一般可采用较少的变压器台数送出全部电能，节省变压器和升高电压侧断路器等设备投资，减少电能损耗和布置场地。④从发电机电压引出直配供电线路较方便。⑤可采用成套配电装置，简化布置。缺点是：①母线或与母线连接的隔离开关故障或检修，需全站停电，可靠性差。②发电机电压配电装置元件较单元接线多，增加维修工作量。

这种接线一般适用于发电机台数不多（例如4台以下）、单机容量不大（例如15 MW以下）的中小型

水电站。

发电机电压单母线隔离开关分段接线 用隔离开关将单母线接线分段。这样，除了分段隔离开关故障或检修需全站停电外，当一段母线及所接隔离开关故障或检修时，只需短时全站停电，将分段隔离开关断开，仍可保持另一段母线所接机组送电。可靠性和灵活性比单母线接线稍高。其它优缺点与单母线接线相同。适用范围也和单母线接线相同。

发电机电压单母线断路器分段接线 用断路器将单母线接线分段。这样，当一段母线及所接隔离开关故障时，分段断路器在继电保护装置的作用下，能自动将故障母线段切除，从而保证了正常段母线不间断供电，在一定程度上克服了单母线接线的缺点，提高了供电可靠性。但是分段断路器故障时需全站停电，而且当一段母线



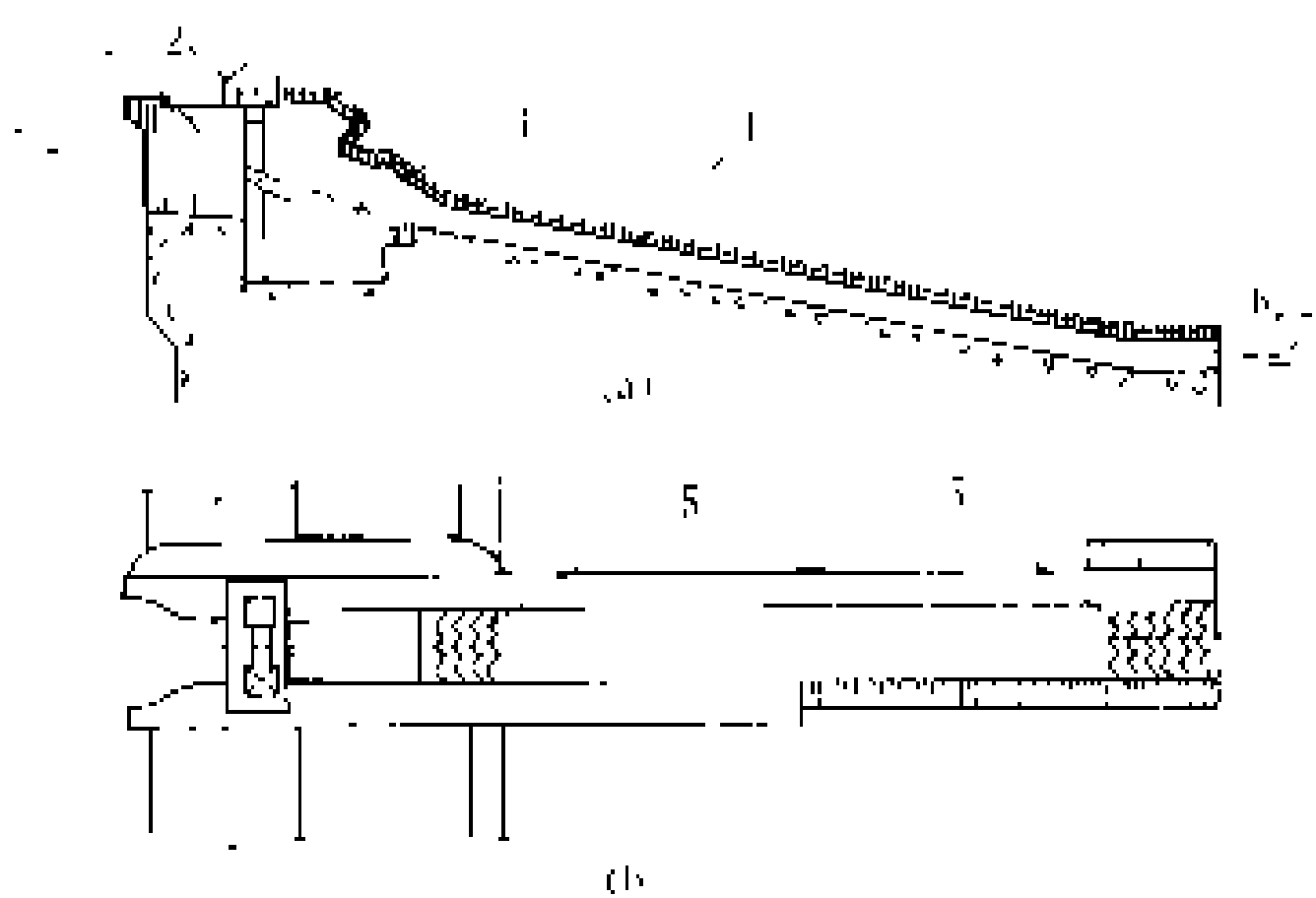
中国映秀湾水电站
电气主接线简图

检修，该段母线上所有设备都要在检修期间停电。这种接线一般多用于中型电站。例如中国映秀湾水电站（装机3×45 MW）即采用了此种接线。

（潘天缘）

fadao

筏道（raft passage way）利用水力将水库中的木竹，沿斜坡渡槽输送到下游河道的过坝设施，又称水筏道。在中、低水头和水量充沛的水利水电枢纽工程中广泛采用。筏道由进口、过木渡槽及出口三大部分组成（见图）。进口的布置应满足不同水位、流量下，漂运到坝前的竹木，能平顺通过。进口一般设有诱导设



筏道布置示意图

（a）纵剖面；（b）平面布置

1—进口；2 操作控制设备；3 活动薄板；4—渡槽；
5 加工工；6—出口

fan 反

施和由闸门、启闭机组组成的控制设备以及相应的土建结构。诱导设施和控制设备应确保在不同工况下能使竹木顺利通过进口，并与渡槽有良好的水流衔接。

过木渡槽在平面上一般取直线布置。如因地形等条件限制，需布置弯道时，对其最小弯曲半径应据竹木径级、长度和排型尺寸等确定。渡槽的纵向坡度应满足竹木安全漂送的要求，槽内水流流态不允许发生水跃。为缩短其长度，可适当加大其纵向坡度，并在槽底板设置加糙工，以满足槽内水深和流态的要求。对加糙工的糙率应进行模型试验验证。渡槽断面形状，常采用梯形及弓形断面。

出口应设置在靠近河流的主流区，其轴线与主流尽可能一致。出口处下游应有消能防冲设施，并与河道水流有良好的衔接。

在中国南方省区，筏道应用较普遍。湖南沅天河东方红排运筏道规模较大，每小时运量达 3000 m³，筏道全长 342 m；上、下游水位差达 34.5 m，上游水位变幅 10.3 m，下游为 3.7 m；进口宽 6.5 m，为适应上游水位变幅的活动板结构渡槽总长 64.64 m，槽内最大水深 1.1 m；固定渡槽的纵坡为多级变坡，平均坡度为 10%，底板采用短梅花齿加糙。

（赵辅鑫）

fangliancang

反滤层（inverted filter）防止土体在不同级配土层界面或自由表面的渗流逸出处发生渗透变形，而又能排水的工程设施。有保护无粘性土的和保护粘性土的两类，其作用机理和选择准则均有所不同。组成反滤层的材料可采用均匀料或非均匀级配料，但必须是非管涌土，质地坚硬，渗透系数要大于被保护土层，填筑时应不发生颗粒离析现象。反滤料可用满足要求的天然砂砾料或人工筛选配制的砂砾料或碎石料。近年来土工合成材料用作反滤层有很大发展，其孔隙大小及渗透性可以人为控制，还可与土工防渗薄膜组成复合材料。反滤层与被保护土层之间应满足反滤要求，使被保护土层不致流失，也不致被细粒土淤塞而失效。

保护无粘性土的反滤层 对于不均匀系数 $C_u \leq (5 \sim 10)$ 的无粘性土，应满足 $D_{15}/d_{85} \leq (1 \sim 5)$ 和 $D_{15}/d_{85} \geq 5$ 的要求。 D 和 d 分别表示反滤层和被保护土层的特征粒径，下角标表示小于该粒径的土重百分数。对于 $C_u > 10$ 的不均匀土，应保护其细料部分， d 应指细料部分的特征粒径。对于连续级配的被保护土，可取 $C_u \leq (5 \sim 10)$ 的细粒部分；对于不连续级配的土，应取级配曲线平段以下的细粒部分。根据选定的反滤层特征粒径及允许的不均匀系数，得到设计的颗粒级配

曲线。不能用上述方法选定反滤料时或对于重要工程，应通过试验论证选定。

保护粘性土的反滤层 应从防渗体开裂时可防止其土粒流失，有利于促进裂缝自愈的角度来选择反滤料，一般用试验决定。一些试验研究表明， $D_{15} \leq (0.5 \sim 2.0)$ mm 的砂砾料可保护粘性土，其大值适用于有稳固团粒结构的粘土，小值适用于分散性粘土，一般沉积粘性土可取中间值。

反滤层的厚度和层数 反滤层厚度理论上只要达到最大粒径的 5 倍即可满足要求，但实际上主要受施工条件控制。反滤层层数不应超过三层，后一层反滤层以前一层反滤层为被保护层选定其级配。根据土层过渡情况和机械化施工条件，人们倾向于增加层厚和减少层数。

（刘 杰）

fangfeiyl cuo shi

防飞逸措施（protection measures from runaway）机组事故甩负荷的同时，调速系统发生故障使导水叶不能关闭，机组将会发生转速的过度升高，甚至达到水轮机飞逸转速，时间过长会使机组转动部分产生不同程度的损坏。防止这种转速过度升高的措施有三种：①在引水道的进水口设快速闸门或蜗壳前设进口阀。②在水轮机调速器中采用过速限制器。过速限制器的工作原理是当机组转速升高至某一预先设定值而导水叶不能关闭时则切断主配压阀与导水叶接力器间的油路，直接把压力油引入导水叶接力器的关闭腔使导水叶迅速关闭。为了使大型机组导水叶接力器或调速环故障也能关闭导水叶，可在每个导水叶上装设由过速限制器动作的单独的事故接力器。过速限制器的油源可以引自相邻机组的油压装置或设置专用的事故油压装置。过速限制器还应有可靠的备用压力油源。③在机组本体的设计中利用作用于导水叶上的水力矩或附加一些其他作用力使得在机组事故甩负荷且调速系统故障时实现导水叶的自关闭。还可以采用制动叶片来限制机组转速的过度升高。正常运行时这些制动叶片处于转轮体内，转速上升到某一定值后张开，增加制动力矩来限制转速升高。

（张学中）

fanghong diaodu

防洪调度（dispatching for flood control）

见洪水调节。

fanghong gao shuiwei

防洪高水位（highist flood control water



level) 水库遇到下游防洪保护对象的防洪标准洪水时,坝前允许达到的最高库水位。防洪高水位是指导水库防洪调度的重要标志,据以区别调节洪水的目标。汛期当库水位处于汛期限制水位和防洪高水位之间时,水库按下游防护对象要求控泄出库流量,保证下游河道流量不超过防洪允许的安全泄量。当库水位齐平或高于防洪高水位且入库流量仍较大时,水库不再以下游安全泄量为约束,加大出库流量以保证大坝安全(见洪水调节)。汛期限制水位与防洪高水位之间的库容为防洪库容。

防洪高水位是在设计阶段选定。选择防洪高水位是有防洪任务水电站设计的主要内容。选择时要研究:①分析洪水特性,选择若干有代表性的设计洪水过程线,包括电站入库洪水过程及坝址到下游防护区的区间洪水过程。②分析防护区河道泄洪条件、建设堤防或蓄洪区条件等,拟定若干防洪标准和河道安全泄量方案。③研究水库设置防洪库容的条件,如坝体工程量、泄水建筑物工程量和水库淹没损失等,拟定若干防洪库容方案。④据以上研究分析得到的数据经过方案比较统一选择出防洪高水位、汛期限制水位、堤防或分蓄洪区设施规模、防洪标准和安全泄量。因为防洪高水位与上述其他特征值互相影响,在中国一般采用分层次选择的方法,如先选定防洪标准,再选定堤防等其他防洪设施规模及河道安全泄量,最后选定防洪高水位和汛期限制水位。也有把上述各项参数组成大量的组合方案,从中同时优化选定。

(欧阳华)

tang tai cuoshi

防抬机措施 (protection measures form upward thrust)

轴流式水轮机在甩负荷过程中,由于导水叶的迅速关闭,水流中断,产生反水锤(见水击)。另一方面在甩负荷过程中或机组带水作调相运行时,机组进入水泵工作状态产生反向水推力。在反水锤、反向水推力的作用下都有可能引起机组转动部分离开推力轴承镜板的支承而急速上抬,然后又很快落下造成机组剧烈的撞击、振动使机组有关部件损坏。常用机械限位、设置补气阀和导水叶分段关闭等措施防止抬机。一般情况下三种措施同时使用。①机械限位用来限制无论什么原因引起的水轮机转动部分的向上移动。②补气阀用来防止当导水叶迅速关闭,水流中断时,由于水流惯性在转轮室形成真空而导致的反水锤。补气阀要求动作灵敏并有足够大的补气量。③导水叶分段关闭的目的是满足调节保证要求的前提下延长导水叶的总关闭时间以减弱反水锤及其向上力。此外,有时还用调相补气阀在甩负荷时进行补气的办法来防

止抬机。对转桨式水轮机还可以在导水叶迅速关闭的同时将桨叶打开,使协联破坏来防止抬机。

(张学中)

fei dianqiliang celiang

非电气量测量 (measurement of non-electrical quantities)

水电站各类非电气运行参数的检测技术。非电气运行参数即非电气量,指的是温度、压力、液位(水位和油位)、水头、液流、流量、差压、转速、开度等等,供监视、控制、调节、制表记录、安全保护、数据传输之用。非电气量的测量,一般通过传感器(或称变换器)把被测量的非电气量转换成模拟量或数字量。

温度测量 水轮发电机组需要测量温度的部位有推力轴承、导轴承,发电机定子铁芯和绕组的温度,发电机冷却器进、出口空气的温度,变压器油温,空气压缩机轴承温度,调速器回油箱油温等。温度测量的方法有:①利用丙酮、氯甲烷、氯乙烷作为工作介质的电触点压力式温度计,用来监视推力轴承、导轴承等处的温度,不仅可通过它的表盘标度直观了解温度的量值,而且当温度超过整定值还可发出控制指令或报警信号。但这种温度计对温度反应不够灵敏,待它报警信号触点动作,轴瓦往往已经烧坏。②动圈式温度指示调节仪与热电阻配套使用。敏感元件有铜热电阻和铂热电阻等,将它埋入需要测量温度的部位,随温度升降而改变其电阻值的大小,通过调节仪的表面标度可直接读出温度量,而且当温度超过限值可发出控制指令或报警信号。③手动测温装置。水轮发电机组的测温点很多,大容量机组可达近百点,不可能每个测温点都单独装温度计,因此大部分测温点的温度只能定时切换测量。靠运行人员定期手动切换多触点开关,逐点测量各测温点的温度并用手抄录。④利用巡回检测装置或计算机监控系统定期对各测温点的温度进行打印制表,当巡检到某一测温点,如果该点温度超过预先整定值,立即自动发出报警信号。

主变压器、空气压缩机等处的测温点很少,一般可单独装设温度信号计。

压力测量 水电站中需要测量压力的部位有调速器的油压装置,快速闸门、阀门控制用的油压或水压装置,断路器液动或气动机构,高、低压压缩空气系统,水轮机轴密封润滑系统、蜗壳压力和尾水管真空度,机组冷却水系统、机械制动系统等处。通常采用的测量压力的方法有:①带触点的压力表,它是有标度指示并能发信号的仪表。②压力信号计,它没有标度,利用弹簧管的变形带动杠杆系统,推动水银开关来发相应信号。③压力变送器,其中一种是当测压元件在压力作用下

产生位移,输出相应的信号,需与自动电位差计及毫伏变送器二次仪表配套使用;另一种是将压力转换为电量的压力变送器。④波纹管式压力计,存在压力时,波纹管产生位移而显示压力。

差压测量 水电站许多部位需要测量差压。如拦污栅堵塞可直接反映栅前和栅后的差压而发信号。供水管道上可利用测量差压来表示水流流通,当水流堵断、差压为零,发出信号。有时也利用差压原理构成钢管爆破保护。测量差压的装置有:①双波纹管差压计,存在差压时,波纹管受力位移,变成相应的扭角使显示仪表显示差压。②膜片(或称膜盒)式差压计,是利用膜片作测压元件,存在差压时,膜片产生位移而产生输出,这套差压计与其他仪表配套可分别进行指示、记录或报警。

液位、水头测量 水电站水库水位、尾水水位、集水井水位、调相时测量转轮下部水位、水轮发电机组轴承油槽油位、调速器以及闸门、阀门控制用的压油槽、回油箱、漏油箱等处的油位均需装设液位测量装置。上述液位测量装置有些是供测量指示用,而大多数参与自动控制、发报警信号,也有两者兼用。因此针对不同的用途要配备不同的测量装置。测量水库水位和尾水水位,以前较多采用浮筒式测量装置。浮筒放在水上随水位升降而升降,由它通过钢丝绳带动鼓形轮转动,从而带动发送自整角机。由发送自整角机通过电联系带动远距离的接收自整角机。按自整角机转动角度刻成的标度来显示水位。如果测量水库水位和尾水水位的接收自整角机改为差动式自整角机,根据上下游水位测量的发送器转角差测得的上下游水位差,即水电站的毛水头。另外,还采用浮筒通过测绳传动机构来带动位置编码器,由显示器来显示水位。近年来国内外均研制了声波水位计,它是利用回声测量、数字显示、并可远距离传送的测量装置。水位计是由声头、波导管和主机组成。声头是将主机发射的电脉冲转换为声脉冲沿波导管向下传播,当遇到波导管内设的标记和水面,就以标记波和水面波的形式先后反射回声头,声头将这些波转换成电信号,送入主机放大计数运算后显示水位的实际标高。

用于自动控制和报警的液位信号器有:①磁钢浮子式液位信号器,由浮子、导管、湿(或干)簧触点等组成,液面的变化,使带有永久磁钢的浮子相应变化,至预定的位置时,湿簧或干簧触点动作、发出信号。②压力式液位计,接受压力的大小来确定是否发信号。③灯泡浮子型液位信号器,每个浮子内装有一个水银开关,随着液位的变化,浮子按预先整定的位置翻转,使水银开关动作,发出信号。④电极式水位信号器,它利用电极来测量不同水位,水位上升使某一电极浸水,此

电极与已浸入水中的电极构成电通路而发出信号。

液流监测 需要监测液流的部位有:水轮发电机水冷却器出口、轴承水冷却器出口、变压器循环油系统。监测液流的装置有:①差压计是利用有液流通过管道孔板时孔板两侧存在差压、液流中断时平压的原理对液流进行监视。②档板式示流信号器是利用液流冲动档板翻转,使之与其连动的永久磁钢接近湿簧触点而动作,液流中断,湿簧触点释放而发信号。③磁钢浮筒式示流信号器,当有液流时,藉流速将浮筒及永久磁环推动上移至预定位置时,使湿簧触点断开,当液流中断,浮筒与磁环下落,湿簧触点接通发出信号。④靶式示流信号器,当通液流时,靶及靶杆受力带动微动开关使其触点断开,断流时,微动开关复原,接通触点、发出信号。

流量测量 长期以来一直利用膜盒式差压计来测量水轮机流量,但精度与可靠性均达不到应有的要求。近年来生产了超声波流量计,它是利用水的声学特性来测量流量。因为水的流速变化会引起声速的变化。利用顺水流与逆水流的频率差,直接测量水流流量。

转速测量 转速检测是用在机组过速保护、自动投切同步装置、投电气或机械制动系统等。常用的转速检测装置有机械型和电气型两种。机械型转速信号器是利用离心力作用构成的。电气型转速信号器可由装在发电机轴上的永磁发电机提供电源,利用永磁发电机电压与转速成线性关系构成转速信号器,也可利用装在发电机轴上齿盘形成的电脉冲经放大运算后组成转速信号器。还可通过装在发电机引出线上的电压互感器提供电源构成数字式转速信号器。

闸门开度测量 一般采用自整角机式,装在闸门上反映闸门开度的发送自整角机与装在显示地点的接收自整角机配套,由装在接收自整角机上的标度来显示闸门开度。也有采用码盘式装置来显示闸门开度,随闸门开度变化带动编码器,再送往显示器显示开度大小。

(张德平)

Feizhou shuinneng ziyuan

非洲水能资源 (hydropower resources of Africa) 据英国《国际水力发电与坝工建设》1993年手册统计,非洲具有水能理论蕴藏量 34000 亿 kW·h/a,技术可开发资源 14000 亿 kW·h/a,经济可开发资源 7000 亿 kW·h/a。

非洲(包括附近岛屿)的面积为 3029 万 km²,共有 51 个国家和地区。非洲气候特点是高温、干燥、少雨,降水量一般从赤道向南北两侧减少。全洲 1/3 的地区降水量不足 200 mm,只有东南部、几内亚湾沿岸及

山地的向风坡的年降水量在 1000~3000 mm 之间。非洲为高原型大陆,平均海拔 650 m。非洲大陆内流河的流域面积占全洲面积的 31%,内流区基本没有水能资源。外流区的河流大部分属于大西洋水系,如扎伊尔河、尼日尔河、沃尔特河等。尼罗河流入地中海,赞比西河流入印度洋。

扎伊尔河又称刚果河,流域面积 382.2 万 km²,平均年径流量 14140 亿 m³。下游自金沙萨至马塔迪 300 km 河段内有落差 260 m,分 3 级开发,共可装机 68500 MW,其中大英加一级可装机 34500 MW,目前仅部分开发,装机 1750 MW。

尼罗河是世界最长的河流,全长 6700 km,流经乌干达、肯尼亚、埃塞俄比亚、苏丹、埃及等国。尼罗河干流已开发 5 级,共装机 2765 MW,最大的是阿斯旺水电站,装机容量 2100 MW。

尼日尔河是非洲第三大河,流域面积 209 万 km²,平均年径流量 2700 亿 m³,全长 4200 km,流经几内亚、马里、尼日尔、尼日利亚等国。尼日利亚境内有 3 座水电站,可装机 2140 MW。几内亚、马里和尼日尔境内还有一些瀑布,是适宜建水电站的地址。

赞比西河流域面积 133 万 km²,全长 2660 km,平均年径流量 5050 亿 m³,规划在干支流建 9 座水电站,共装机 13880 MW,已建成 4 座共 3920 MW。

表中列出了非洲若干国家的水能资源及其已利用程度。

非洲若干国家的水能资源及其开发情况

国 家	技术可开发 水电装机容量 (MW)	经济可开发 水电装机容量 (MW)	1990 年已建 水电装机容量 (MW)	已建水电占 技术可开发比例 (%)
扎 伊 尔	120000	70000	2772	2.3
喀 麦 隆	23000	8000	530	2.3
安 哥 拉	23000	8000	412	1.8
加 蓬	18000	6000	204	1.1
莫 桑 比 克	15000	9350	2078	13.9
尼 日 利 亚	12400	6000	1900	15.3
赞 比 亚	12000	6000	2245	18.7
埃 塞 俄 比 亚	12000	5000	230	1.9
刚 果	11000	3000	120	1.1
坦 桑 尼 亚	9500	2000	259	2.7
肯 尼 亚	6000	1000	498	8.3
几 内 亚	5000	2200	47	1.0
埃 及	3800	3000	2745	72.2
津 巴 布 韦	3800	3000	633	16.7
象 牙 海 岸	3000	1800	895	29.8
苏 丹	2700	2000	225	8.3

注:资料来源:英刊 *International Water Power & Dam Construction* March 1991.

fenqi wuyan doliu

分期围堰导流 (stage diversion) 水工建筑物分期分段利用围堰挡水施工的导流方式。对拟修建的主体建筑物(如闸、坝等)分先、后期施工。先期修建的围堰只拦住一侧河床或一部分河床,构成第一期施工基坑,水流由基坑外被束窄的河道下泄。在第一期基坑内,需将闸、坝修建至某一临时挡水高程,并建成永久泄水建筑物或临时性的导流泄水通道(如底孔、梳齿、缺口等)。当第一期主体工程施工告一段落,具备一定的挡水与泄水能力时,拆除第一期围堰,水流改由第一期工程已建成的泄水通道下泄(一般安排在枯水期进行),与此同时建成第二期围堰,拦断另一侧河床构成第二期施工基坑。分期围堰一般分为两期到三期。

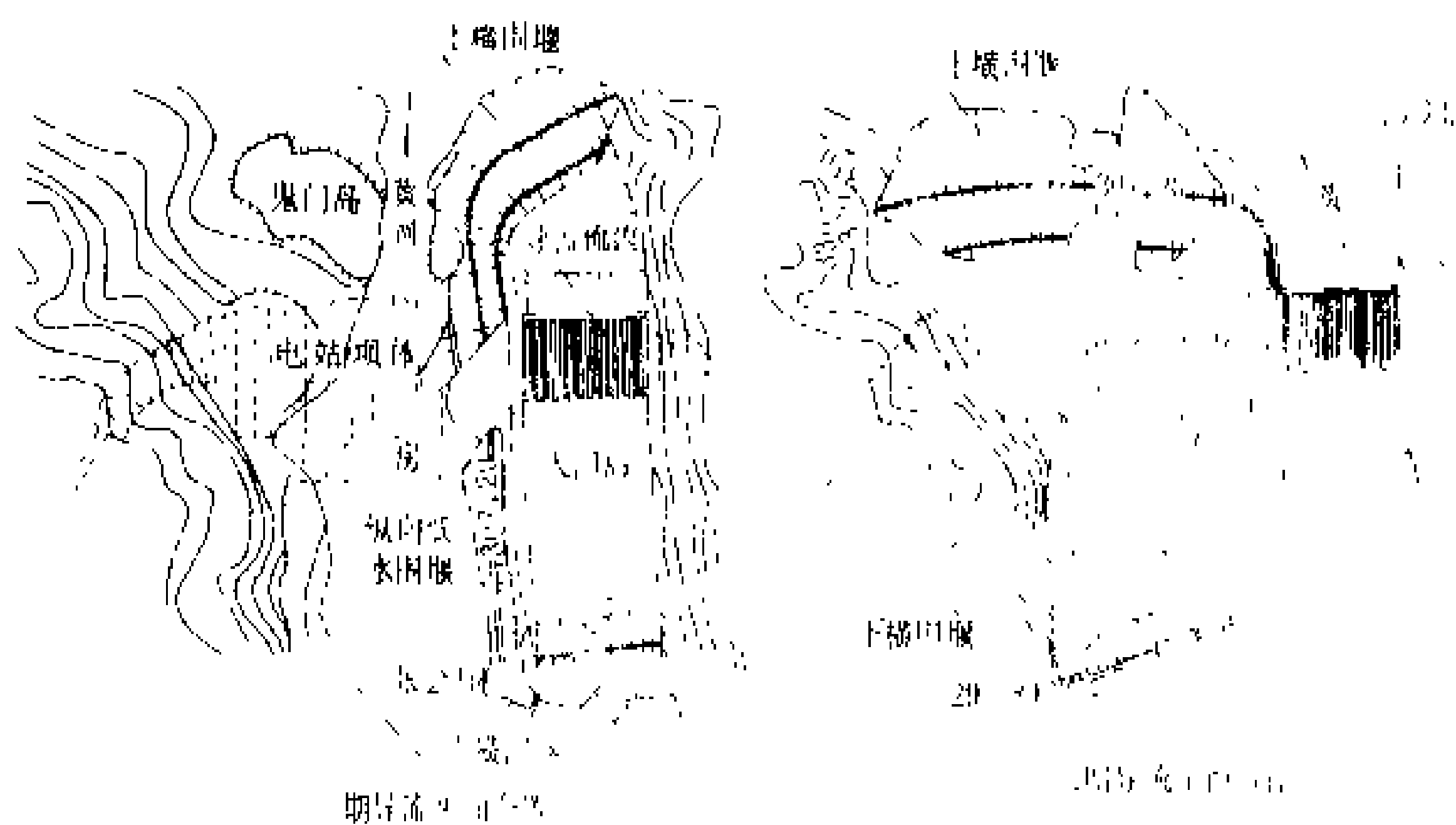
分期围堰包括上游横向围堰、顺河的纵向围堰及下游横向围堰三部分。第一期基坑的上、下游横向围堰后期须拆除,所以往往设计为土石围堰。纵向围堰一般先、后期共用,常设计为混凝土结构,它自身的施工尚需在其临水面外侧修建一低挡水标准的围堰保护。纵向围堰是在一期基坑内修建的,它占据着部分主体建筑物位置,为解决这一矛盾,常以这段主体建筑物代替纵向围堰。主体建筑物以外部分的纵向围堰也可用做永久工程,例如做为导墙或隔墙等。二期上、下游横向围堰在主体工程完工后一般需拆除,但也有后期不拆除的,如不妨碍水库运用的上游围堰,可让它淹没在水

库里。若一期基坑布置有电站时,有时可能利用二期围堰挡水以提前蓄水发电。有的工程将下游围堰留做二道坝,构成静水池在泄洪时起消能作用。

分期围堰导流适合于宽河床,大流量,主体建筑物结构允许分段施工、分段独自挡水的工程,故常用于混凝土重力坝工程。对于土坝或拱坝等要求整体平起施工的建筑物是不适宜的。由于分期导流在河床中要设置纵向围堰和导流泄水建筑物,所以要求河床有一定的宽度,故也不适用于窄河床。在宽河床上,尤其是有宽滩地的复式河床或河道中有岛礁、河心洲等地形条件时,这种导流布置最为方便。宽滩地可在枯水期低水位时稍加围护,就能构成施工工作面条件。岛礁或河心洲地形便于布置纵向围堰。中国葛洲坝水利枢纽工程,江中的葛洲坝和西

(高又生)

坝这两个岛地,将长江分割为大江、二江、三江三个河槽,导流布置条件相当好。工程分两期施工,一期围二江、三江,二期大江工程施工(见施工导流)。中国黄河三门峡水利枢纽工程,河中有鬼门、神门、人门三个岛。第一期先围左岸利用神门、人门两岛连接上游横向围堰(简称上横围堰),利用人门岛和其下游的另一小岛张公岛连成纵向低水围堰,并连接下游横向围堰,构成一期基坑,在基坑内修建混凝土纵向围堰及 12 个 $3\text{ m} \times 8\text{ m}$ (宽 \times 高)的导流梳齿(坝段内垂直水流方向的混凝土浇筑面高程高低相间,形似梳齿状,中间低面过水、两侧高面露出水位),然后利用梳齿过水开展二期工程。在二期施工的同时,将一期基坑梳齿顶面盖上钢筋混凝土盖板,使 12 个梳齿变为 12 个 $3\text{ m} \times 8\text{ m}$ 的底孔,并在底孔上面继续浇筑大坝混凝土。见图。



三门峡水利枢纽施工导流平面布置图

分期围堰导流的主要优点是：①第一期导流为原河床泄水，过水断面宽，泄流量大，无需设置高围堰挡水和宣泄大流量的大型导流泄水建筑物。第二期只要修上、下游横向围堰，充分利用一期坝体布置泄水设施，如通过底孔或缺口坝段导流。因而其施工导流工程规模和费用都较节省，导流技术难度也较易解决。②形成基坑的工期一般较短，有利于主体工程早开工。③对于具有河床式厂房或坝后式厂房的水电枢纽，有条件时，先围发电厂房段，可争取早发电。④原河床导流对施工初期河道通航、过木十分有利。

分期围堰导流的主要缺点是：①主体建筑物不能整体平起施工。②分期修建围堰工期长，施工程序多，工序不连贯。③施工场地和辅助工程设施需两岸布置，运行管理不便。器材物资供应要过河运输以及基坑内机械设备的转移等因素都将加大工程施工强度和工程费用。

(章景安)

fermei'ui

粉煤灰 (fly ash) 火电厂燃烧煤粉由烟道中排出的废弃粉末, 又称飞灰。在配制混凝土中粉煤灰用做活性矿物掺和料。

粉煤灰的颗粒大多呈球形,颜色暗灰,视煤质不同而有深有浅。一般细度与水泥类似。磨细粉的比表面积约为 $3000 \sim 7000 \text{ m}^2/\text{g}$, 掺入混凝土后增加了混凝土中的浆液量,能减少泌水率,改善混凝土的和易性,增加混凝土密实性、抗渗性和抗化学侵蚀性。粉煤灰的化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 和 MgO 。前三种成分含量的多少与其火山灰活性的大小呈直线关系。检验粉煤灰的品质指标,主要有细度、烧失量、需水量、 SiO_2 含量和含水量等。

粉煤灰的掺量一般不超过其基准混凝土水泥用量

的 30%~50%。在大体积混凝土中常用超量的粉煤灰替代一部分水泥,以达到节约水泥和降低水化热的目的。当水泥用量不变时,可用以取代部分细骨料,提高混凝土的强度。当骨料含有碱活性成分时,掺用一定量粉煤灰可抑制碱-硅反应,防止混凝土因体积膨胀而开裂(见天然骨料)。粉煤灰对钢筋有一定的锈蚀作用,所以钢筋混凝土应限定掺量。此外它的抗冻性也较差,对寒冷地

区建筑物的临水面特别是水位变动区的混凝土，一般不宜掺用粉煤灰，如若掺用应同时掺入引气剂。（见外加剂）

(章景安)

Fengman Shuidianzhan

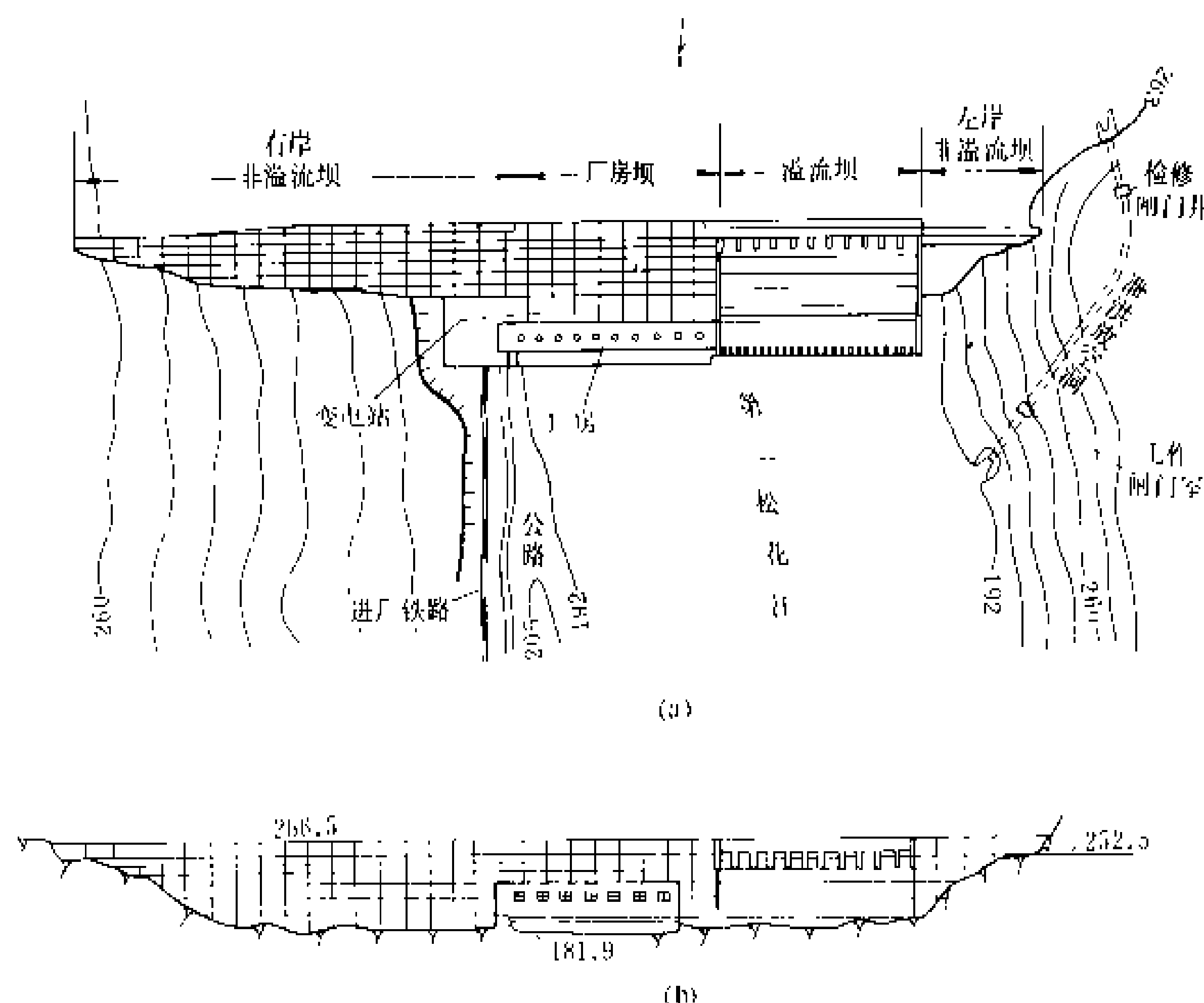
丰满水电站 (Fengman Hydropower Station) 位于第二松花江中游, 吉林省吉林市境内, 以发电为主, 兼有防洪、灌溉以及工业和城市供水等综合利用效益。装机容量 723.75 MW, 保证出力 175 MW, 年发电量 19.41 亿 kW·h。以 8 回 220 kV 输电线向吉林、长春、哈尔滨和辽宁省送电。它是东北电力系统的骨干电站, 在系统中担负调峰、调频和事故备用任务。大坝为混凝土重力坝, 最大坝高 90.5 m。(参见彩图插页第 12 页 19 图)

电站于日本帝国主义占领东北时期的1937年动工兴建,1943年第一台机组发电。1945年抗日战争胜利时,土建工程完成89%,工程质量低劣。1949年中

华人民共和国成立后续建,并对已建部分大坝进行加固处理。1953年基本完成土建工程。1959年完成8台机组的安装。1988年开始扩建,扩机容量170 MW。

水文和水库特性 坝址以上流域面积42500 km²。原设计的水文和水库运行参数已根据延长的水文系列进行了修正。多年平均年径流量136.8亿 m³。水库总库容107.8亿 m³,具有不完全多年调节性能。大坝的设计洪水标准为千年一遇洪水,相应洪峰流量23200 m³/s,相应洪水位266.0 m。按万年一遇洪水校核,相应洪峰流量30200 m³/s,相应洪水位266.5 m。正常蓄水位为261.0 m,相应库容81.2亿 m³;死水位为242 m,相应库容27.6亿 m³;调节库容58.5亿 m³。汛期防洪控制水位261 m,防洪库容26.7亿 m³。设计水头64.2 m,最大水头71.5 m,最小水头49.6 m。

枢纽布置 枢纽由非溢流坝段、溢流坝段、厂房坝段和厂房,以及左岸泄洪放空隧洞等建筑物组成,见图。



丰满水电站枢纽布置图
(a) 平面布置; (b) 下游立视

大坝为混凝土重力坝,坝基为玢岩。坝顶长1080 m,坝顶高程为266.5 m。坝顶以上设防浪墙,高2.2 m。河床左侧坝段为溢流坝,堰顶高程252.5 m,设11个溢流孔,孔高6 m,宽12 m。孔口由平板钢闸门控制,2台门式启闭机启闭。最大泄流能力为9240 m³/s。左岸泄洪放空隧洞,长682.9 m,洞径9.2 m,进水口底坎高程205.0 m,最大泄流能力1186 m³/s。其进水口在正常蓄水位下39 m,采用水下岩塞爆破方法施

工,爆除量3794 m³,一次爆破成功。

坝后式地面厂房,长231 m,宽22 m,高38 m。用压力钢管引水。厂内安装10台混流式机组:60 MW的1台,65 MW的2台,72.5 MW的5台,85 MW的2台及厂用小机组1台(1.25 MW)。3号、5号水轮机转轮直径4350 mm;7号、8号转轮直径4300 mm;9号、10号转轮直径4200 mm;1号、2号、4号、6号转轮直径4360 mm。9号和10号水轮机最高效率为94.6%,设计点效率为92.5%。

屋外变电站在厂房和大坝之间,其开关站为高式布置,采用双母线接线。变压器场地安装10台(组)主变压器,其中1号、7号为三相变压器,每台容量为120 MV·A;3号为三相变压器,容量170 MV·A;4号为三相变压器,容量70 MV·A;2号、5号、6号、8号、9号、10号为单相变压器组,每组容量为90 MV·A。

大坝老化及处理 至1988年,丰满大坝已运行

45年,在风化、冰冻、溶蚀作用下,老化现象明显,表面严重破损,呈软化、疏松、剥落状。1986年调查,上游面破损约1300 m²,下游面破损6100 m²(不含溢流面),破损深度一般为10~40 cm,个别达1 m多。溢流面局部受渗水冻胀作用,坝面凸起龟裂。1986年泄洪时,发生部分溢流面冲坏事故,冲坏面积7500 m²,冲深约2 m,冲掉混凝土1000 m³,已修复。坝体漏水溶蚀混凝土,经水质化验分析,平均每年溶出石灰质约9.02~9.84 t。现已开始对大坝进行全面加固处理。在上游面225~245 m高程之间挂混凝土预制板,混

凝土预制板与坝面之间灌沥青混凝土,形成厚10 cm的防渗层。245 m高程以上坝面外包混凝土。对渗漏较大坝段,进行坝体水泥灌浆处理。

运行效益 自1948年解放至1990年底,累计发电667.57亿 kW·h。水库蓄水以后,入库洪峰大于10000 m³/s的洪水有4次,发生在1951年、1953年、1957年和1960年,其中1953年、1957年两次接近百年一遇。1957年8月,入库洪峰16000 m³/s,水位达

feng 风

266.18 m，最大下泄流量 5810 m³/s，削减洪峰 10190 m³/s，减轻了下游洪水灾害。灌溉用水流量 350 m³/s，灌溉面积约 347 万亩。工业与城市供水流量 120 m³/s。保证航运最大流量 400 m³/s。丰满水库又称松花湖，已成为东北有名的旅游风景区之一。

(谷云青)

feng
风 (wind) 空气相对于地面的运动。气象上常指空气的水平运动。以风向、风速(风力)表示。风向指风的来向，一般以 16 个方位(见表 1)或 360°表示，风速为单位时间空气的行程，以 m/s 或 km/h 计。气象台(站)测定平均风速和最多风向常用风向风速计。没有仪器时，可根据炊烟、旌旗、布条展开的方向及人的感觉按风力等级表估计风力(见表 2)。风力等级表系根据 1805 年英国人 F. 蒲福(F. Beaufort 1774~1857)所提出的风力等级修订的。上述均指地面风而言。气象部门还观测高空风，通常释放气球用经纬仪观测。风既是天气预报的必要项目，又是预报其他天气项目的重要依据。水电站设计中，挡水建筑物的风浪超高计算及输电线杆塔设计要依据当地的风向、风速资料。水电站施工期间安排高空作业也需要了解风的情况。

表 1 风向的缩写表(16 方位)

风 向	缩 写	风 向	缩 写	风 向	缩 写
北 东 北	NNE	南 东 南	SSE	西 西 北	WNW
东 北 北	NE	南	S	西 北 北	NW
东 东 北	ENE	南 西 南	SSW	北 西 北	NNW
东	E	西 南	SW	北	N
东 东 南	ESE	西 西 南	WSW	静 风	C
东 南	SE	西	W		

表 2 风 力 等 级 表

风力等级	名称	陆 上 地 物 特 征	相当于平地 10 m 高处的风速(m/s)	
			范 围	中 数
0	无 风	静，烟直上	0.0~0.2	0
1	软 风	烟能表示风向，树枝略有摇动	0.3~1.5	1
2	轻 风	人面感觉有风，树叶有微响，旗子开始飘动，高的草开始摇动	1.6~3.3	2
3	微 风	树叶及小枝摇动不息，旗子展开，高的草摇动不息	3.4~5.4	4

续表

风力等级	名称	陆 上 地 物 特 征	相当于平地 10 m 高处的风速(m/s)	
			范 围	中 数
4	和 风	能吹起地面灰尘、纸张，树枝摇动	5.5~7.9	7
5	清劲风	小树摇动，内陆水面有小波	8.0~10.7	9
6	强 风	大树枝摇动，电线呼呼有声，撑伞困难	10.8~13.8	12
7	疾 风	全树摇动，迎风步行感觉困难	13.9~17.1	16
8	大 风	折毁小树枝，人迎风前行阻力甚大	17.2~20.7	19
9	烈 风	草房遭到破坏，屋瓦被掀起，大树枝折断	20.8~24.4	23
10	狂 风	树木可被吹倒，一般建筑物遭破坏	24.5~28.4	26
11	暴 风	大树可被吹倒，一般建筑物遭严重破坏	28.5~32.6	31
12	飓 风	陆上少见，摧毁力极大	≥32.7	

(夏方位)

Fengtan Shuidianzhan
风滩水电站 (Fengtan Hydropower Station)

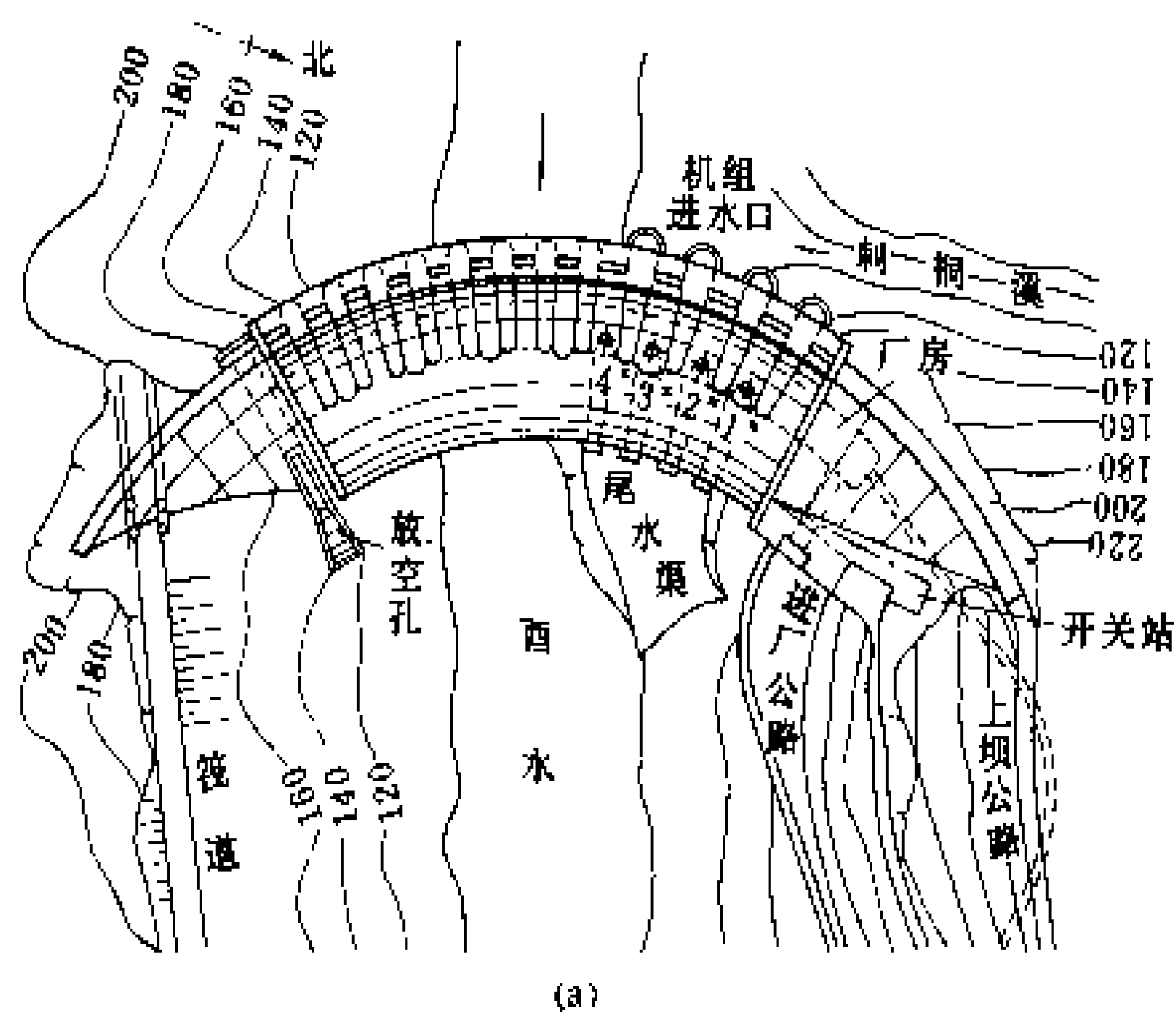
位于沅江支流西水上，湖南省沅陵县境内，以发电为主，兼有防洪、灌溉和航运等综合效益。装机容量 400 MW，保证出力 93.5 MW，多年平均年发电量 20.121 亿 kW·h。用 2 回 220 kV 输电线路向常德和益阳送电，用 3 回 110 kV 输电线路向周围地区送电。大坝为空腹重力拱坝，最大坝高 112.5 m。工程于 1970 年 10 月开工，1978 年 5 月第一台机组发电，1979 年 12 月 4 台机组全部投产。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 17500 km²。多年平均年径流量 158.9 亿 m³。水库总库容 17.33 亿 m³，具有季调节性能。大坝的设计洪水标准为千年一遇，相应洪水流量 29400 m³/s，相应洪水位 209.56 m。校核洪水标准为五千年一遇，相应洪水流量 34800 m³/s，相应洪水位 211.44 m。正常蓄水位 205 m，相应库容 13.9 亿 m³。死水位 170 m，相应死库容 3.3 亿 m³。调节库容 10.6 亿 m³。汛期防洪控制水位 198.5 m，防洪库容 6.22 亿 m³。电站设计水头 73 m，最大水头 91 m，最小水头 54 m。

枢纽布置 枢纽由大坝、泄洪设施、放空底孔、坝内厂房、筏道等建筑物组成,见图。

坝址区为前震旦系板溪群砂岩夹少量板岩,岩性致密坚硬,但断层、节理发育。大坝为混凝土空腹重力拱坝,坝顶高程 211.5 m,坝顶弧长 488 m。坝内空腹沿坝轴线长 255.8 m,宽 20.5 m,高 40.1 m。坝顶设 13 个溢流孔,堰顶高程 193 m。孔口尺寸:宽 14 m,高 12 m。设有弧形闸门,每门由 2 台电动固定式启闭机启闭,最大泄流能力 30920 m³/s。高低鼻坎挑流消能。

大坝右侧设一个放空底孔,矩形进水口,断面尺寸为 6 m×12 m,进口底坎高程 145 m,进口设平板事故检修门,出口设弧形工作门,断面尺寸 6 m×7 m,最大泄流量 1236 m³/s。



凤滩水电站平面布置及空腹坝体剖面图

(a) 平面布置; (b) 电站坝剖面

1—大坝; 2—厂房; 3—机组进水口; 4—溢洪道

坝内式厂房布置于 9~12 号坝段空腹内,见图。厂房尺寸为 85 m (长)×20.5 m (宽)×40.1 m (高)。厂内装有 4 台 100 MW 混流式水轮发电机组 (参见彩图插页第 25 页 48 图)。水轮机转轮直径 4.1 m。由 4 条沿上游坝面垂直下降,然后穿过坝体的圆形有压钢管引水,钢管直径 5.6 m,进口底坎高程 155 m。电站最大引用流量 648 m³/s。开关站位于大坝左岸,3 台三相双线圈 120 MV·A 和 1 台三相自耦 240 MV·A 主变压器布置在左岸进厂洞口靠上坝公路侧。

右岸筏道设有一座垂直加斜面升船机,通航吨级为 50 t,年运木材 14.5 万 t,货物 10 万 t。

运行效益 自 1978 年第一台机组发电至 1990 年底,累计发电量为 216.12 亿 kW·h。防洪方面,常见洪水频发,入库洪峰在 10000 m³/s 以上的洪水,已发生多次。1983 年 6 月 17 日至 30 日洪水入库洪峰流量

10160 m³/s,最大下泄流量 6890 m³/s,削减洪峰流量 32%。航运方面,改善了上游航道 100 km,下游航道 59 km。

设计和施工单位 先后由湖南省水利水电勘测设计院和水利电力部中南勘测设计院设计,湖南省水电工程局和水利电力部第八工程局施工。

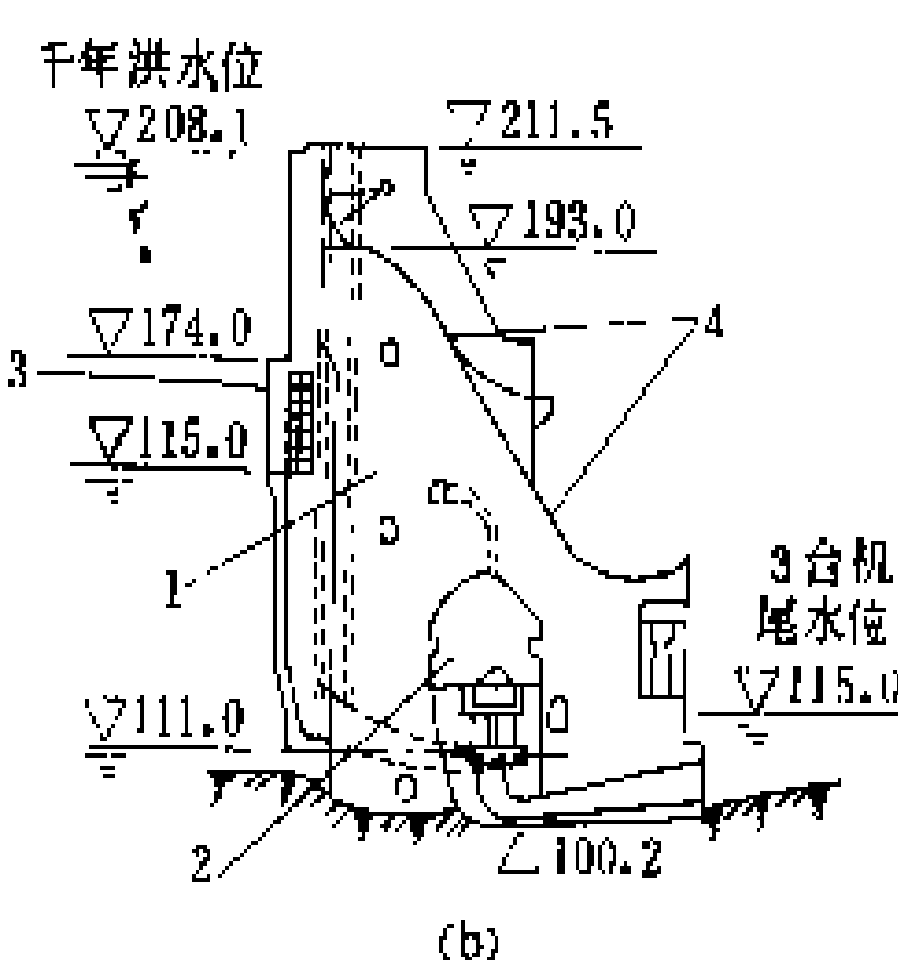
(谷云青)

fu changfang

副厂房 (auxiliary power house of hydro-power station) 专门布置各种电气控制设备、

配电装置、公用辅助设备以及为生产调度、检修、测试等的用房。副厂房应设哪些房间及各种房间的面积大小,主要由水电站的装机规模,在电力系统中位置,自

动化水平及所在地区环境条件等决定。设置原则是满足水电站运行、维修、管理需要,又尽量节约工程费用。大中型水电站副厂房一般设有中央控制室、继电保护室、电子计算机室、电缆室、发电机电压配电装置室、厂用电设备室、



蓄电池室、充电机室、通信室、油系统、供水和排水泵房、空气压缩机室、通风机房、电工修理间、电气试验室、机械修理间、调度、值班、办公、资料等用房。小型水电站可简化合并。

中央控制室 集中监视和控制水电站运行的场所。室内净空高度一般为 4~5 m,面积由控制方式及水电站规模决定,有良好的照明、通风、防潮、采暖、空调、隔声、防虫、防尘等性能。位置靠近主机间,可设在主厂房上游侧、下游侧,或者端部。小型水电站有的控制设备较少,操作简单,监控表盘设在主厂房内,无专门的中央控制室。

继电保护室 为了运行管理方便,大中型水电站常将大部分继电保护装置(见继电保护)集中布置在单独的继电保护室内,并紧靠中央控制室。当开关站离中央控制室较远,输电线路及高压侧电气设备的继电保

副厂房

护室可在开关站内另设。继电保护室的室内环境要求与中央控制室相同。

电子计算机室 大中型水电站运行调度及检测的数据处理,使用电子计算机(见计算机监控系统)日趋普及。电子计算机室一般邻近中央控制室,防尘及室内温湿度应符合要求。

电缆室 又称电缆层,中央控制室和继电保护室下面电缆密集,大中型水电站常设有专门的电缆层,净高一般 2~3 m。

发电机电压配电装置室 又称发电机电压开关室,布置发电机出线的配电装置,一般靠近发电机出线一侧,以尽量缩短发电机电压侧接线长度。有的将配电装置集中布置于一室,有的按机组单元分室布置。室内净空都要满足设备的搬运、检修、试验和观察要求,室内的隔墙和通道要符合防火、防爆的规定。

厂用电设备室 布置厂用变压器和厂用电高、低压配电装置。安装油浸式厂用变压器的小间要用防火墙、防火门隔离,地面设有贮油坑等设施。厂用电高、低压配电装置通常分置于单独房间内。

蓄电池室 蓄电池是水电站二次设备的直流电源(见控制电源),一般设有专门的通风机,把有害气体排出厂外。布置位置要避免设在中央控制室、继电保护室、配电装置室、通信室的上部,并最好能直通厂房外。蓄电池室、酸室及套间的地面、墙裙、台架都要用耐酸蚀材料铺砌,地面能防渗并有排水设施,墙壁及屋顶天花板要严密无缝并能防腐蚀。对非防爆式蓄电池室还要考虑可向外泄压。

充电机室 供蓄电池充电用。充电设备可用整流充电装置或充电机。当用充电机充电时,因其振动和噪声影响大,一般都离开中央控制室较远。

通信室,包括载波机室、交换机室和值班室等,要求环境安静、清洁,房间数和面积由设备布置要求定。

油系统 包括油库、油处理室和油化验室,又分为绝缘油和透平油两类。绝缘油库多设在厂房外交通方便的地方。透平油库有的设在厂房内如安装间下层或与水轮机层高程接近的地方。油处理室通常与各类油库相邻。油库和油处理室要有防火措施,并与其他房间隔离。油化验室可设厂房内或厂房外,具备良好通风、防尘、防火。(见水电站油系统)

供水和排水泵房 采取下游水泵供水的水泵房常布置于尾水副厂房底层。采取上游自流引水时,供水设备有的设在厂、坝间副厂房中,有的设在机组旁。机组检修排水和厂房渗漏水排水的卧式泵房和集水井通常布置在厂房基础最低处,当设有立式深井泵时,其电动机一般置于设计尾水位以上。

空气压缩机室 一般布置在安装间下层、尾水副

厂房等适宜利用的场所,但要避开中央控制室、继电保护室、电子计算机室、通信室等对防振、防噪声有较高要求的房间或设备。

通风机房 地面封闭式厂房、地下和坝内厂房,一般都设有机械通风系统,通风系统的通风机运行时噪声较大,主要通风机要避开中央控制室、通信室和值班室等对环境要求比较高的场所远一些,并要注意做好通风机房及风道的隔音和防振。

电工修理间 规模及所配备器具视水电站装置的电气设备情况而定。

电气试验室 一般布置在运输方便以及设备较集中的地方。室内要有良好通风、采暖、防尘、防潮设施。

机械修理间 许多水电站在厂房外设有专门的机械修配厂,厂房内仅需设置简单的修理间。

调度、值班、办公、资料等用房 根据水电站规模、自动化程度及机构和人员编制情况因地制宜布置。

(李必如)

fuchangfang buzhi

副厂房布置 (arrangement in auxiliary power house) 见副厂房。

Fuchunjiang Shuidianzhan

富春江水电站 (Fuchunjiang Hydropower Station) 位于浙江省桐庐县境内富春江上,距离杭州市 100 km,以发电为主,兼有航运、养殖等综合利用效益。电站装机容量 297.2 MW,保证出力 51 MW,多年平均年发电量 9.23 亿 kW·h,以 110 kV 和 220 kV 电压接入华东电力系统,供电给杭州、上海等市。为低水头河床式水电站。主坝为混凝土重力坝,最大坝高 47.7 m。工程于 1958 年 7 月开工,1962 年停缓建,1965 年复工,1968 年 12 月第一台机组发电,1977 年建成。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 31645 km²,多年平均年径流量 315 亿 m³,多年平均流量 1000 m³/s。工程按百年一遇洪水设计,于年一遇洪水校核。设计洪水流量 23100 m³/s,相应库水位 24.7 m。校核洪水流量 33800 m³/s,相应库水位 28.2 m。水库正常蓄水位 23 m,相应库容 4.4 亿 m³;死水位 21.5 m,相应库容 3.5 亿 m³。为Ⅱ调节水库。电站最大水头 17.7 m,最小水头 6.4 m,设计水头 14.3 m。

枢纽布置 枢纽建筑物从左岸起为河床式厂房、鱼道、挡水坝段、溢流坝段和船闸,见图。坝顶高程 32.2 m,坝顶长 560 m。

河床式厂房内安装 5 台竖轴轴流转桨式水轮发电

机组。1号机组为苏联制造，单机容量 57.2 MW，额定转速 62.5 r/min，水轮机转轮名义直径 8 m，发电机为伞式空冷型，额定电压 13.8 kV，定子铁芯内径 13.5 m。2、3 号机组为中国制造，单机容量 60 MW，其他同 1 号机组。4、5 号机组为法国制造，单机容量 60 MW，额定转速 71.4 r/min，水轮机转轮直径 8 m，

设在左右两岸，引水流量分别为 1.5 m³/s 和 5 m³/s。

泄洪设施 溢流坝全长 287.3 m，设有 17 孔坝顶溢洪道，采用连续鼻坎面流消能方式，孔口宽 14 m，高 13 m。堰顶高程 11.6 m，最大泄流量为 33800 m³/s。5 台机组引用流量 2500 m³/s。

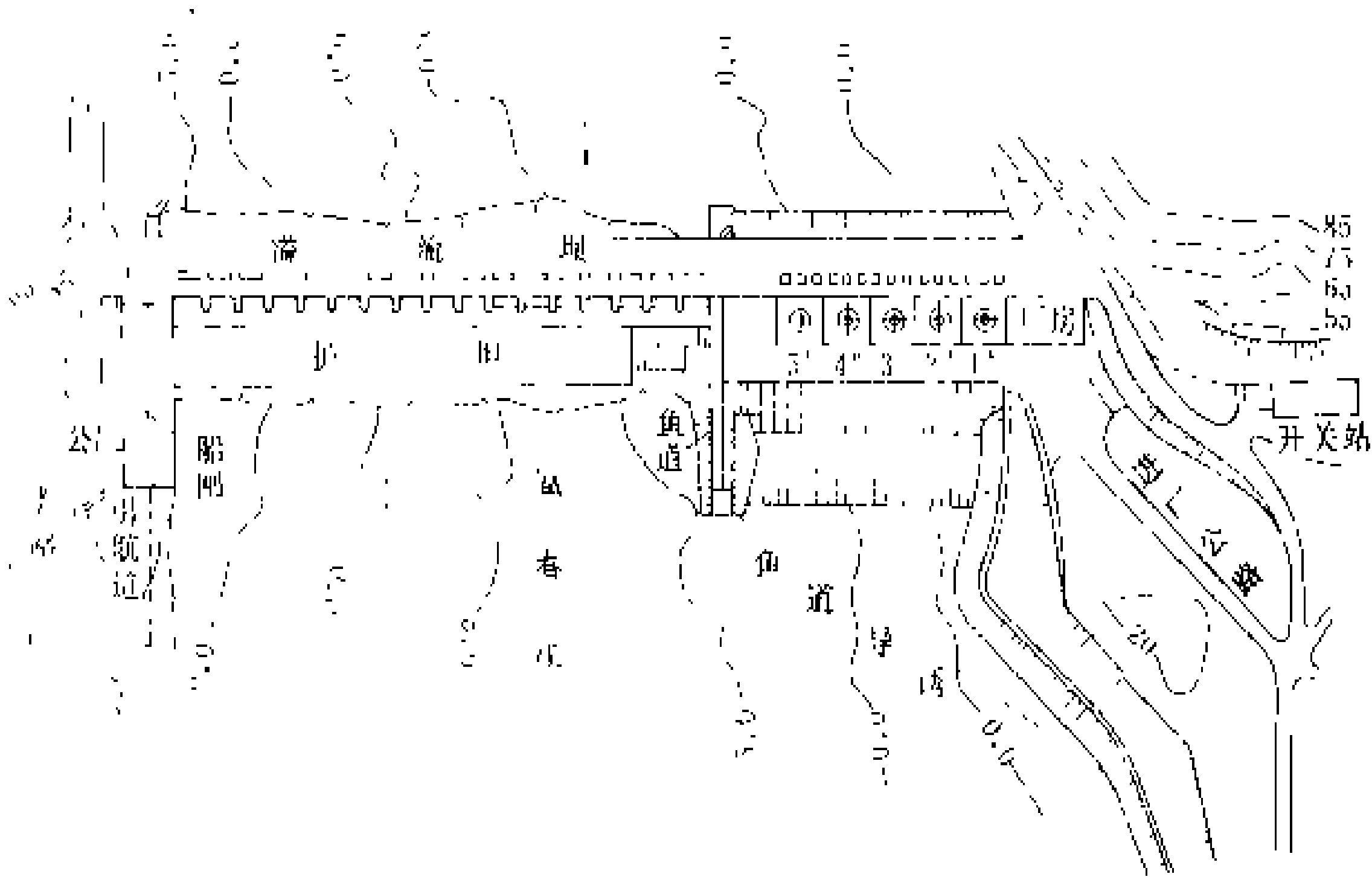
运行效益 电站自第一台机投产发电至 1990 年

底止，累计发电 163.9 亿 kW·h，为华东地区提供廉价电力。为了进一步提高电站经济效益，发挥水电站在电力系统中的作用，增加调峰能力，自 1984 年始对电站控制系统进行技术改造，应用计算机实现机组自动控制和经济运行，以适应机组频繁开停机需要，提高运行可靠性。初期采用计算机开环指导，实现最佳负荷分配，提高机组效率。全厂机组现已实现闭环控制。根据 1985 年实际运行统计，实现

经济运行可提高机组效率约 1%，每年可多获得电量约 900 万 kW·h。

设计和施工单位 上海勘测设计院设计，水利电力部第十二工程局施工。

(李维藩)



富春江水电站枢纽平面布置图

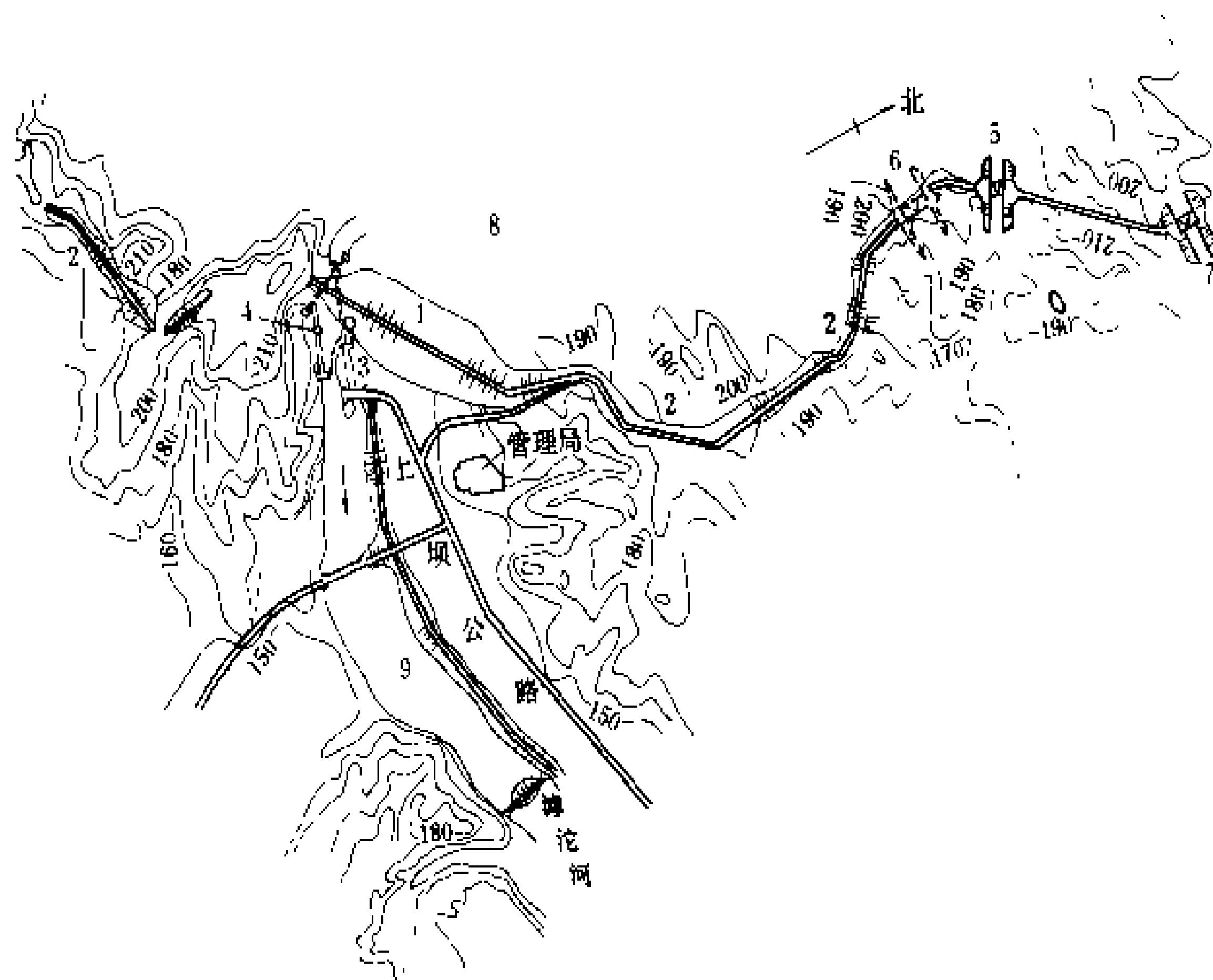
发电机为伞式空冷型，额定电压 13.8 kV，定子铁芯内径 11.71 m。屋外开关站布置在下游左侧。鱼道全长 158.5 m，宽 3 m，建成后未曾使用过。船闸上闸首为挡水重力式结构，闸门为下沉式，船闸提升高度 19 m，闸室长 103 m，宽 14.4 m，水深 2.5 m。灌溉渠首分

G

Gangnan Choushui Xu'neng Dianzhan

岗南抽水蓄能电站 (Gangnan Pumped Storage Power Station)

混合式抽水蓄能电站。位于海河流域子牙河系滹沱河上、河北省平山县境内。电站装有单机容量 15 MW 的常规水轮发电机组 2 台和单机容量 11 MW 的抽水蓄能机组 1 台。总装机容量 41 MW，年发电量 6674 万 kW·h，用 110 kV 输电线路接入河北省电力系统。工程于 1958 年 3 月开工，1960 年 3 月常规机组发电，1968 年 5 月抽水蓄能机组投运，1969 年 1 月完工。工程布置示意图。



岗南抽水蓄能电站工程布置示意图

1 主坝；2—副坝；3 厂房；4—泄洪洞；5—第一溢洪道；6—第二溢洪道；7—非常溢洪道；8 上水库；9 下水库

上水库和下水库 上水库为岗南水库，坝址以上流域面积 15900 km²，多年平均年径流量 14.1 亿 m³。水库最高水位 207.7 m，总库容 15.7 亿 m³，正常蓄水位 200 m，相应库容 11.21 亿 m³，死水位 180 m，死库容 3.41 亿 m³，为年调节水库。主坝按百年一遇洪水设计，洪峰流量 8980 m³/s，按千年一遇加 10% 校核，洪

峰流量 15620 m³/s。建有 1 座主坝及 17 座副坝。主坝坝基有砂卵石覆盖层深 10~19 m，下为花岗片麻岩。主副坝均为粘土斜墙坝。主坝顶高程 209.19 m，最大坝高 63.19 m，坝顶长 1701 m。17 座副坝总长 4757 m，其中最高的坝高 39 m。主坝东侧副坝设有 3 座溢洪道。第一溢洪道，安装 4 扇弧门，尺寸为 12m×12.3 m。第二溢洪道安装 8 扇弧门，尺寸为 15.5 m×9 m。最大溢洪量分别为 5640 m³/s 和 9410 m³/s。另外有河岸开敞式非常溢洪道 1 座，必要时可炸开溢洪道堰前堵坝泄洪，泄量 3500 m³/s；有泄洪洞 1 条，直径 5.4~6 m，泄流量 468 m³/s；直径 6m 的输水洞 1 条，泄流量 381 m³/s。

利用原为供水修建的拦河闸坝形成下水库。设有 11 孔平面闸门，尺寸为 5.5 m×4 m。水库运行最高水位 146.5 m，蓄水 192 万 m³；最低水位 145.5 m，蓄水 112 万 m³。调节库容为 70~80 万 m³，可满足抽水蓄能机组 10 h 抽水量。

上游引水系统 圆形压力引水隧洞位于主坝右岸，混凝土衬砌，洞径 6 m，长 389 m。隧洞入口为岸边式进水口。隧洞尾部设斜卧箱式调压井，井底高程

194.0 m，井顶高程 211.5 m，方井，宽 8.5 m，长 25.5 m。压力钢管道主要直径 5.8~3.4 m，逐次分为 3 条支管。1 号机（抽水蓄能机组）直径 2.6 m。2 号、3 号机组支管直径 3.4 m。钢管全长 70 m。

厂房 岸边式主厂房宽 15.52 m，长 45.38 m，高 13.4 m。副厂房长 45.38 m，宽 5.58 m，高 8 m。

机电设备 2 号和 3 号机组为常规机组。混流式水轮机，额定水头 46.1 m，设计流量 38.3 m³/s，单机出力 15.75 MW，发电机额定容量 15 MW。1 号机组为抽水蓄能机组。水泵水轮机为斜流可逆式，转轮直径 2.5 m。水泵运行工况，最大扬程 59 m，设计扬程

52 m，最小扬程 31 m。相应输入功率分别为 14500 kW，13500 kW 和 5250 kW。相应流量分别为 22.3 m³/s，23.6 m³/s 和 14.3 m³/s。转速 273/250 r/min。水轮机工况，最大水头 64 m，额定水头 47 m，最小水头 28 m。相应输出功率分别为 13000 kW，10900 kW 和 4400 kW。相应流量分别为 23.1 m³/s，27.2 m³/s 和 20.9

m^3/s 。转速 250 r/min 。发电电动机为悬式空冷。电动机工况，输出功率 $14.5/13.7 \text{ MW}$ ，电压 10 kV ，电流 $865/820 \text{ A}$ 。发电机工况，额定容量为 $15.00 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ，额定电压 10.5 kV ，额定电流 825 A ，额定功率因数 0.85 。晶闸管静止励磁装置，容量 120 kW ，电压 220 V 。

抽水蓄能机组配油浸风冷式三相变压器。带负载调压。额定容量 $15 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ，电压为 $(121+6 \times 1.66\%) \text{ kV}/(10.5-5.25) \text{ kV}$ ，可做电动机起动时的半电压起动电源。常规机组采用扩大单元接线，配 1 台油浸风冷、三绕组、三相变压器，额定电压 $121 \text{ kV}/10.5 \text{ kV}/35 \text{ kV}$ ，额定容量 $36 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

设计和施工单位 北京勘测设计院设计，河北省岗南水库工程局施工。

(杨承沪)

gaocheng

高程 (elevation) 由高程基准面起算的高度。以平均海面为零点起算的高度为绝对高程或称海拔；以任意基准面起算的高程为相对高程或称假定高程。测量学中采用不同的基准面计算的高程系统。①地面点沿垂线方向至大地水准面的高度为正高系统；②地面点沿正常重力线至似大地水准面的高度为正常高系统；③地面点沿法线至椭球面的距离为大地高程系统。

根据 1959 年中国国务院批准的《中华人民共和国大地测量法式》(草案) 规定我国采用正常高系统，应用“1956 年黄海高程系统”统一全国高程。1987 年启用“1985 国家高程基准”，废止“1956 年黄海高程系”。两者的差值为 0.029 m ，其关系为

$$\begin{aligned} & 1985 \text{ 国家高程基准高程} - 0.029 \text{ m} \\ & = 1956 \text{ 年黄海高程系高程} \end{aligned}$$

在全国高程系未统一之前，水利水电部门为江河流域的河道治理、规划设计及工程建设需要，以及旧中国的军事和铁路等部门曾设有吴淞、大沽、大连、废黄河、坎门、珠江、罗星塔等高程系，还有假定高程等。因黑龙江及鸭绿江等国际河流的合作开发，曾联测了苏联的波罗的海高程系统和朝鲜的仁川高程系统。

(茅玉清)

gaocheng kongzhi celiang

高程控制测量 (vertical control survey)

全国或某区域内求得统一高程的控制测量工作。它主要由水准路线组成的水准网(即高程控制网)来体现。中国的国家高程控制测量分为一、二、三、四等水

准测量。一等水准是国家高程控制网的骨干，是研究地壳垂直运动及有关科学问题的依据。二等水准附合于一等水准环上，是国家高程控制的全面基础。三、四等水准测量为直接求得平面控制点的高程供地形测图和各种工程建设的高程需要。平面控制点的高程也可用三角高程法测定。水电工程的高程控制测量，为了控制整个流域或河流(河段)的开发治理，一般采用沿河布设水准路线或组成环网等，并与国家水准点联测。特殊地区则可设临时的近似高程或假定高程，埋设坚固的标石以待日后联测。高程控制的测量方法有水准测量、三角高程测量、气压高程测量和特殊水准测量。

水准测量 高程测量中的基本方法，利用水准仪和水准尺测定地面两点之间的高差，又称几何水准或直接水准。根据不同的精度要求与作业方法，分为：①精密水准测量。指一、二等水准测量。施测时除应用精密水准仪和因瓦水准尺之外，操作规定中严密考虑了系统误差与偶然误差的消除和防止积累。如应用带有测微器的水准仪提高读数精度；采用因瓦水准尺减少气温变化影响；规定前后视距基本相等，以消除水准轴与视准轴不平行而产生的误差，限制视距长度与视线离地面的高度等，以减少大气折光影响；采用往返观测并以奇数站按后、前尺(基础分划)和前、后尺(辅助分划)，偶数站按前、后尺(基本分划)和后、前尺(辅助分划)的观测顺序，以消除仪器与尺桩沉陷影响。按中国 GB12897-91《国家一、二等水准测量规范》规定，一等水准测量每公里偶然中误差不得超过 $\pm 0.45 \text{ mm}$ ；每公里全中误差不得超过 $\pm 1.0 \text{ mm}$ 。二等水准测量每公里偶然中误差不超过 $\pm 1.0 \text{ mm}$ ，每公里全中误差不超过 $\pm 2.0 \text{ mm}$ 。精密水准测得的高差应加入正常重力位水准面不平行和重力异常改正，归化为正常高。②普通水准测量。一般指三、四等水准测量，用于加密精密水准网，或建立独立测图的高程控制和工程测量的高程控制，以及联测大地控制点的高程。一般采用普通水准仪和区格式双(黑红)面水准尺中丝读数法。三等水准以“后前前后”，四等水准以“后后前前”顺序观测，视距长度可视仪器精度不同适当放宽。③特殊水准测量。在水准路线遇到不可避免的障碍，如江河、湖塘、宽沟、山谷等视距长度超过规范要求，不能应用一般方法观测，则可采用水准仪过河水准测量或倾斜螺旋法测量；也可采用经纬仪倾角法或光学测微法。在寒冷地区，条件适合，也可采用冰上过河法等。四等水准测量时可在平缓河流、静水湖泊、池塘等没有明显横比降地段用水面传递高程。

三角高程测量 通过观测两点间的水平距离和天顶距(垂直角)求出两点间的高差的方法，又称间接高程法。可与平面控制测量同时进行，多数应用于地形起

gao 高

伏较大地区平面控制点的高程联测。三角高程测量受大气折光影响较大,宜采用对向观测消除其影响,当单向观测时必须作折光系数 K 的改正。三角高程可采用单一路线、闭合环、结点网等形式布设,路线一般选择边长较短和高差较少的边组成,起迄于水准高程点上。在工程测量中还可代替五等水准。

气压高程测量 应用气压计进行高程测量的一种方法。大气压力以毫米水银柱 (mmHg) 高度表示,随高度而变化,每升高 11 m, 压力减少 1 mm。由于大气压受气象变化影响很大,只用于低精度的高程测量或踏勘时的草测。其优点是使用方便。现在中国国家法定压力单位采用帕 (Pa), 它和毫米水银柱 (mmHg) 间的换算关系为

$$1\text{ mmHg}=133.332\text{ Pa}$$

(茅玉清)

gao hansha shuiliu

高含沙水流 (hyper-concentrated flow)

含沙量很高,流体性质发生改变,需要把水和泥沙的混合物作为一个整体考虑的水流。自然界中的泥石流、高含沙洪水及管道高浓度输送的流动均属于高含沙水流。

判定是否为高含沙水流不仅取决于含沙量的大小,更重要的是所含泥沙颗粒的粗细和矿物成分。细颗粒泥沙即使含沙量较少,也将影响流体的性质,使之具有高含沙水流的特性。粗颗粒泥沙则要达到很高的含沙量才会使流体具有高含沙水流特性。对发源于黄土高原的黄河干支流,一般含沙量超过 $300\sim400\text{ kg/m}^3$ 时即成为高含沙水流。

性质 含有大量泥沙颗粒,特别是细颗粒的浑水,已不再是牛顿流体而成为非牛顿流体。多数情况下高含沙浑水可以近似地用宾汉流体描述。只有当切应力 τ 大于某一初始值 τ_0 (宾汉切应力) 时,这种流体才会发生流动,而且其粘性远大于清水的粘性,见图,图中

$\frac{du}{dy}$ 为 y 点的切变速率。

高含沙浑水粘性大幅度增加和存在宾汉切应力,导致其中的泥沙颗粒的沉速大幅度减小,甚至有些颗粒在浑水中保持静止。在高含沙浑水中保持不下沉的最粗颗粒的粒径,可由浑水的宾汉切应力、密度以及泥沙的重率确定。粗颗粒在高含沙浑水中的沉速可用类似于清水中确定颗粒沉速的方法,即按颗粒的阻力系数与雷诺数的关系曲线试算确定。此时雷诺数组成中的粘滞系数要用包括宾汉切应力的有效粘滞系数代替。

“浆河”与“揭河底”现象 高含沙浑水具有极高

的粘性、极小的泥沙颗粒沉速和极大的挟沙能力,使得高含沙洪水通过河道时常会发生异常剧烈的冲淤现象。

中国陕北黄河的一些小支流曾观察到在高含沙洪水的落水过程中,整河浑水会产生停滞和流动交替的间歇运动,称为“浆河”现象。黄河干流龙门水文站曾观察到当高含沙洪峰通过时,厚约 1m 的成片河床泥沙被揭掀起露出水面,短时间内河床有大幅度冲刷,称为“揭河底”现象。如 1970 年 8 月初的一次高含沙洪峰过程,在十四五小时内,使龙门站测流断面的河床刷深 9 m。

牛顿流体与宾汉流体的
流型曲线

应用 高含沙浑水中泥沙颗粒沉速大幅度减小,泥沙颗粒不易落淤,使高含沙水流挟沙能力远大于一般挟沙水流。高含沙引洪淤灌,管道高浓度输送,水库高含沙异重流排沙等,都是利用此特性输送更多的泥沙或其他物质(如煤)。高含沙水流的阻力一般大于清水,但恰当的颗粒级配组成可以使其阻力减小。

(万兆惠)

gaosu shuiliu

高速水流 (high-velocity flow)

水利水

电枢纽中高水头泄水建筑物过流时,伴随产生的空化、掺气、脉动、振动的水流现象。一般将流速超过 $15\sim20\text{ m/s}$ 的水流视为高速水流。

高速水流是随着高坝建设的发展而逐渐形成的水工水力学范畴的一个分支学科,其主要内容包括以下几个方面。

(1)高水头泄水建筑物或其他过流边界处,因局部压力降低而发生的空化现象与空蚀破坏。

(2)高速水流与空气接触而上,气水掺混而形成的水流掺气和挑流雾化现象(见掺气水流)。

(3)高速水流过水面上动水压力脉动及其诱发的薄体结构物振动现象。这种场合,需考虑水流与结构弹性变形的相互作用,因而发展了考虑附加质量、附加阻力的水弹性力学。

(4)陡坡明渠在突然收缩、扩散、转弯、变坡的地方往往产生斜向驻波,即冲击波。明渠急流冲击波也是高速水流现象之一。为工程运行安全计需研究消除冲击波的方法,具体计算常用特征线法。

(5)高速含沙水流对过流面的磨损,亦属高速水流问题。建在多沙河流上的水电站,汛期泄洪、排沙、发

电,往往造成泄水孔、排沙洞或水轮机过流面的磨损,如中国黄河三门峡水库底孔遭受泥沙磨损就是典型的例子。

高速水流问题研究,旨在为水电站建筑物防蚀、防振、防磨、防冲及消能设计,寻求技术可行、经济合理的工程措施。

(时启燧)

Gezhouba Shuli Shunlu

葛洲坝水利枢纽 (Gezhouba Hydroproject)

长江干流上第一座大型低水头水电、航运枢纽。

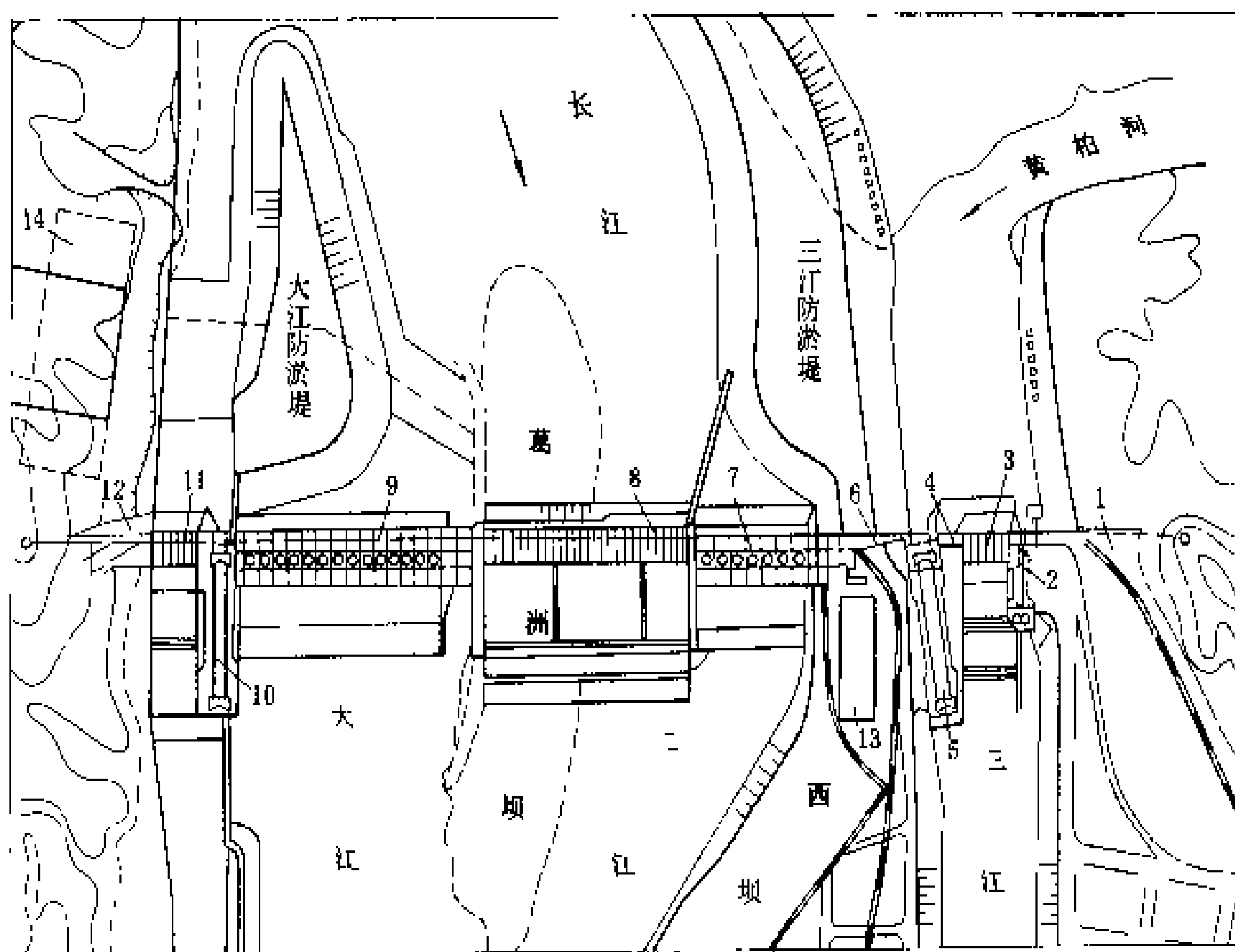
位于湖北省宜昌市,长江三峡出口 2.3 km 处。为三峡水利枢纽的反调节梯级。枢纽具有发电和航运综合效益。装机容量 2715 MW,保证出力 768 MW,多年平均年发电量 157 亿 kW·h。混凝土闸坝,最大坝高 53.8 m。分大江和二江两个电厂,分别以 500 kV 和 220 kV 电压接入华中电力系统,并通过换流站以 +500 kV 直流向华东电力系统供电。工程施工采用分期导流,分两期施工的方案:一期,二、三江施工,大江通航;二期,大江施工,利用二、三江已完建

建筑物通航、泄流和发电。一期工程于 1970 年开工,1981 年 1 月大江截流,6 月三江船闸通航,7 月二江电厂发电;二期工程于 1982 年开工,1986 年 6 月发电,1988 年 12 月全部机组安装完毕,大江船闸建成;1989 年竣工。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 100 万 km²,多年平均年径流量 4510 亿 m³,多年平均流量 14300 m³/s,多年平均年输沙量 5.2 亿 t。正常蓄水位 66m,死水位 63 m,水库无调节能力。设计洪水流量 86000 m³/s 时,相应坝前水位 66 m,下游尾水位 59.5 m。校核洪水流量 110000 m³/s 时,相应坝前水位 67 m,相应总库容 15.8 亿 m³。电站最大水头 27 m,最小水头 8.3 m,设计水头 18.6 m。

枢纽布置 枢纽建筑物自左岸至右岸,顺序为左

岸土石坝、3 号船闸、三江冲沙闸、三江混凝土非溢流坝、2 号船闸、黄草坝、混凝土心墙坝、二江电厂厂房、二江泄水闸、大江电厂厂房、1 号船闸、大江泄水冲沙闸、右岸混凝土挡水坝。220 kV 和 500 kV 开关站分设西坝和右岸,见图。坝基由粘土质粉砂岩、粘土岩、砂岩和砾岩等组成。有多层软弱夹层,有的已经泥化,岩层倾向下游,倾角 4°~8°。为了提高抗滑稳定性,坝下设有齿墙,截断软弱夹层;坝前设防渗板以加大渗径;坝下抽排水,降低扬压力;并采取措施提高下游岩体的整体性。坝顶高程 70 m,挡水前沿总长 2606.5 m。(参见彩图插页第 7 页 9 图)



葛洲坝水电站枢纽平面布置图

1—左岸土石坝;2—3号船闸;3—三江冲沙闸;4—三江混凝土非溢流坝;5—2号船闸;6—黄草坝混凝土心墙坝;7—二江电厂厂房;8—二江泄水闸;9—大江电厂厂房;10—1号船闸;11—大江泄水冲沙闸;12—右岸混凝土挡水坝;13—220kV 开关站;14—500 kV 开关站

泄洪和排沙 二江泄水闸共 27 孔,前沿总长度 498 m,最大泄流量 83900 m³/s。闸型为开敞式平底闸,闸室长 65 m,闸底高程 37 m。孔口宽 12 m,高 24 m。每孔设上下双扉闸门,上扉为平板门,下扉为弧形门,均宽 12 m,高 12 m。闸墩内布置有预应力锚束结构,以承受弧门的水平推力。护坦单宽流量达 170 m³/(s·m)。闸后设有 180 m 长的平底消力池,底部采用分区封闭抽排水式结构,池后接 70 m 长的防冲护固段,闸尾设深 20 m 的防淘墙和长 85 m 并设有加糙墩的柔性混凝土海漫,总长 335 m。

三江冲沙闸共 6 孔,总宽度 108 m,最大泄流量 10500 m³/s。采用平底闸,闸室长 58 m,底板高程 48 m。孔口宽 12 m,高 10.5 m。设弧形闸门。采用三级消力池,总长 405.5 m。

葛 洲

大江泄水冲沙闸共9孔,每孔宽12 m,高19.5 m。闸室长52.2 m,底板高程42 m,最大泄流量20000 m³/s。

发电厂房和主要机电设备 二江发电厂房长327 m,宽33 m,高77.15 m。厂内安装2台170 MW和5台125 MW轴流转桨式水轮发电机组,总容量为965 MW。水轮机转轮直径分别为11.3 m和10.2 m,额定转速分别为54.6 r/min和62.5 r/min。发电机均为伞式空冷型,额定电压13.8 kV,额定功率因数0.875,额定容量分别为194.2 MV·A和143 MV·A,定子铁芯内径分别为17.6 m和15.6 m。大江发电厂房长596.2 m(挡水前沿长582.2 m),宽33 m,高76.14 m。厂内安装14台125 MW轴流转桨式水轮发电机组,总容量为1750 MW,机组参数和结构型式均与二江厂房125 MW机组相同。

二江电厂主变压器布置在尾水平台上,采用发电机-变压器单元接线。高压侧为220 kV,采用双母线带旁路接线,出线8回,其中2回经2台360 MV·A自耦变压器升压为500 kV,接入大江开关站。二江开关站布置在二江厂房下游左岸,采用铝管硬母线配单柱式隔离开关,每个间隔间距12 m。

大江电厂7台300 MV·A的主变压器布置在厂房尾水平台上,3组扩大单元接线(每组4台机组、2台变压器)和1组扩大单元接线(2台机组、1台变压器)。高压侧为500 kV,采用一个半断路器接线。进线6回,其中2回为二江开关站经自耦变压器与大江开关站的联络线。出线6回,其中2回各接1台150 MV·A的并联电抗器。500 kV开关站(参见彩图插页第28页53图)位于大江厂房右岸上游1 km处,采用连续多跨四分分裂铝管组合硬母线配单柱式隔离开关布置,间隔间距30 m,总长192 m。220 kV和500 kV系统间的联络变压器布置在500 kV开关站。

直流换流站布置在大江厂房右岸下游3 km处,由大江开关站出2回500 kV线到直流换流站。换流站采用双极系统,每极有1组600 MW500 kV阀组向华东电力系统输电,总容量1200 MW。

通航设施 共设2条航道和3座船闸。大江航道建有1号船闸(参见彩图插页第47页94图),三江航道建有2号和3号船闸。1号和2号船闸,闸室有效尺寸相同,长280 m,宽34 m。最小坎上水深,1号船闸为5.5 m,2号船闸为5 m,可通过大型客货轮和万吨级船队。3号船闸闸室有效尺寸,长120 m,宽18 m,最小坎上水深3.5 m,可通过3000 t客货轮和地方船队。3座船闸远景设计单向通航能力,每年5000万t。

工程施工 主体工程量为土石方开挖5800万m³,土石方回填3090万m³,混凝土浇筑1042万m³,

钢筋钢材32.7万t。

坝址处江面宽2200 m,被葛洲坝和西坝(其上游部分称黄草坝)两座江心岛分为大江、二江和三江。大江为主河槽,二江、三江在枯水期断流。施工采用分期导流方案:一期围二、三江施工,大江过流、通航;二期围大江施工,利用二、三江已建的建筑物通航、泄流和发电。大江截流流量为4400~4800 m³/s,最大落差3.23 m,最大流速7.5 m³/s,采取先在龙口抛投钢架石笼和混凝土四面体组成拦石坝的护底措施,一次截流成功,历时仅36h23 min。

运行效益 葛洲坝水利枢纽自1981年投入运行到1991年6月末,已累计发电980.33亿kW·h,航运过坝2340万人次,运输货物达6106万t。葛洲坝水库回水改善了上游航道,使航运安全性提高,单位马力货运量增加,成本降低。

设计单位和施工单位 长江流域规划办公室设计,葛洲坝工程局施工。

(李维藩)

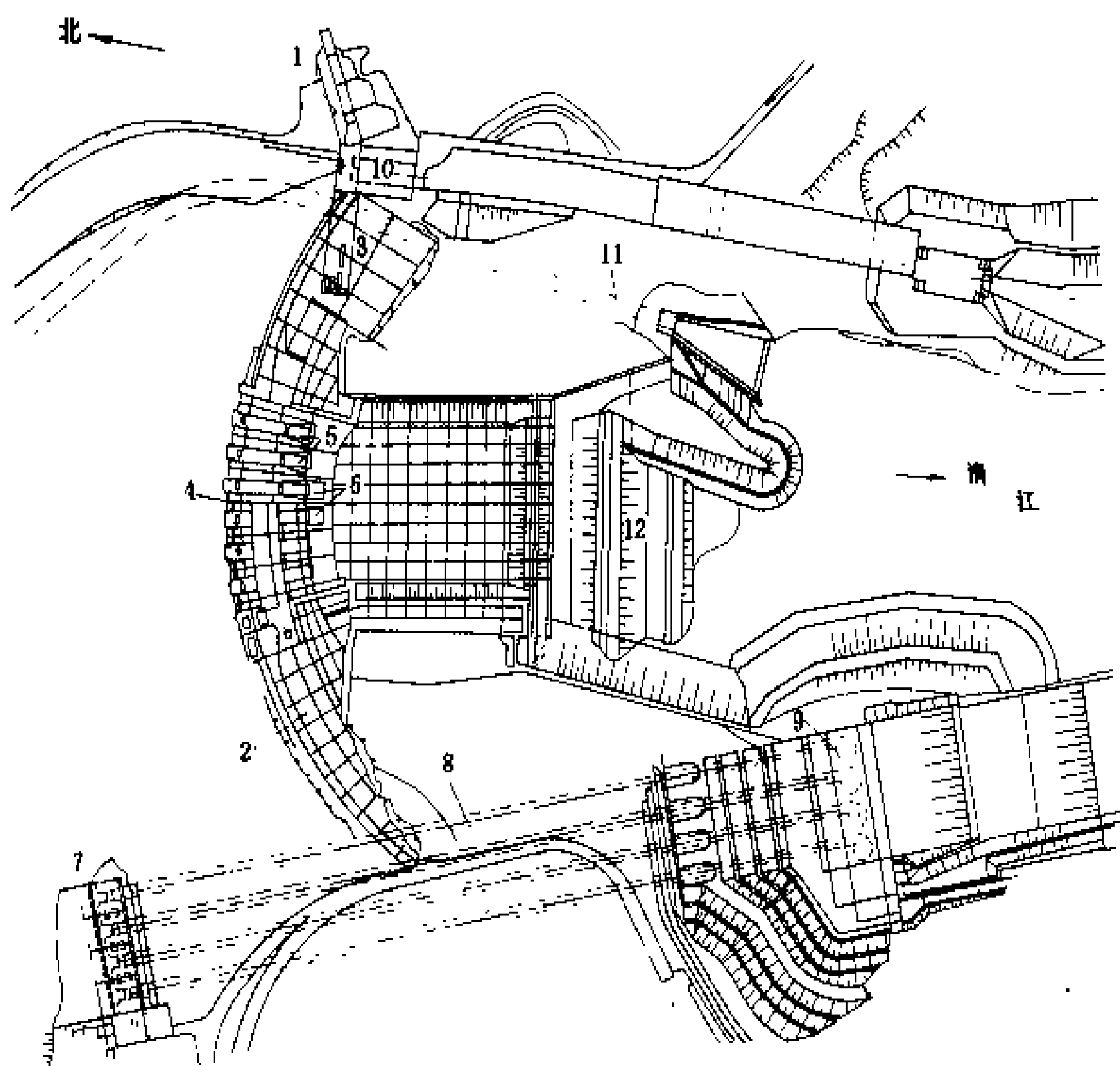
Geheyan Shuidianzhan

隔河岩水电站 (Geheyan Hydropower Station)

清江干流开发的第二个梯级,位于湖北省长阳县境内,以发电为主,兼有防洪、航运等综合效益。装机容量1200 MW,保证出力187 MW,年发电量30.4亿kW·h。以2回500 kV输电线路接入华中电力系统,担负调峰、调频任务,并以220 kV电压向湖北省供电。汛期预留5亿m³防洪库容,可提高下游沿江城镇和农田的防洪标准,并可减轻长江荆江河段的洪水威胁。主坝为混凝土重力拱坝,最大坝高151 m。1987年1月开工,1993年6月和12月第一、二台机组相继发电。

水文及水库特性 坝址以上流域面积14430 km²,占全流域面积的85%。多年平均流量403 m³/s,多年平均年径流量127亿m³。千年一遇设计洪水流量22800 m³/s,相应库水位202.77 m;万年一遇校核洪水流量27800 m³/s,相应库水位204.59 m,总库容37.7亿m³。正常蓄水位200 m,相应库容34亿m³;死水位160 m,调节库容22亿m³,为年调节水库。电站设计水头103 m,最大水头121.5 m,最小水头80.7 m。

枢纽布置 坝址地层由石牌页岩、石龙洞灰岩及平善坝灰页岩互层组成。坝基岩体为石龙洞灰岩,岩层缓倾上游,岩性不均一,构造断裂切割严重,喀斯特发育。地震基本裂度6度,设计烈度7度。枢纽建筑物由混凝土重力拱坝、右岸岸边式厂房、左岸垂直升船机等建筑物组成,见图。



隔河岩水电站平面布置图

1 左岸重力坝段; 2—重力拱坝; 3—重力墩; 4—溢流表孔; 5—泄洪深孔; 6—放空底孔; 7—进水口; 8—引水隧洞; 9—厂房; 10 垂直升船机; 11 导流隧洞; 12—下游围堰

主坝为混凝土三心单曲重力拱坝, 坝顶高程 206 m, 坝顶总长 653.5 m (包括升船机及左岸重力坝段), 坝顶宽 8 m, 最大底宽 (厚) 79 m。坝体上游面直立, 顶部一定高程不并缝, 上部为重力式结构, 坝坡 1:0.7, 下部为重力拱坝, 坝坡 1:0.5。平面拱圈中间部分为等截面, 两侧为变截面, 下游面采用较小的圆弧贴角, 外半径 312 m, 最大中心角 74.5°。封拱高程采用斜拱方式, 河床中间坝段封拱高程 180 m, 两侧坝段封拱高程逐渐下降, 至拱端部位降至 150 m。左岸设置重力墩。对两岸坝肩基础存在的不稳定块体, 用置换混凝土和固结灌浆办法处理。坝基设置防渗帷幕。

泄洪设施包括 7 个溢流表孔和 4 个泄洪深孔, 相间布置。表孔尺寸为 12m×18.2 m (宽×高), 堰顶高程 181.8 m, 最大泄量 19950 m³/s。深孔出口控制断面尺寸为 4.5 m×6.5 m, 进口底坎高程 134 m, 最大泄量 4200 m³/s。消能方式采用表孔宽尾墩、深孔挑流、消力池联合消能工。还设有 2 个 4.5 m×6.5 m (出口尺寸) 兼做后期导流的放空底孔, 进口高程 95 m。

岸带式厂房位于右岸。主厂房长 142m, 宽 38.6m, 高 65.3m。内装 4 台机组, 单机容量 300 MW。单机单管引水。4 条引水隧洞直径 9.5 m, 后接直径 8 m 的压

力钢管。混流式水轮发电机组, 水轮机转轮直径 5.74 m, 额定转速 136.4 r/min, 额定出力 310 MW, 最高效率 95.29%, 设计点效率 94.48%。发电机为空冷伞式, 额定电压 18 kV, 额定容量 340 MV·A, 额定功率因数 0.9。高压配电装置采用气体绝缘金属封闭电器, 布置在厂房上游侧。

采用两级垂直升船机, 总提升高度 122 m, 第一级 40 m, 第二级 82 m。可通过 300 t 级船队, 年通过能力 340 万 t。

工程施工 设计主要工程量为: 土石方开挖 543 万 m³, 土石方填筑 67 万 m³, 混凝土浇筑 328 万 m³, 帷幕灌浆 22 万 m, 固结灌浆 17 万 m, 钢筋钢材 6 万 t。施工导流采用枯水期隧洞导流、汛期围堰过水的导流方式。对外交通以公路运输为主, 水运为辅。

设计及建设单位 长江水利委员会设计, 湖北省清江开发公司负责建设。

(王华阳)

gongcheng celiang

工程测量 (engineering survey) 为资源开发的规划、设计、施工、运营管理等所进行的测量工作的总称。工程测量是以大地测量学、普通测量学、摄影测量学与遥感、地图制图学等的理论、技术和方法为基础, 解决应用对象测量中的理论、误差分析处理和应用问题的特殊技术和方法, 现已发展成为测绘学的一个分支——工程测量学, 或称实用测量学。水电工程测量是工程测量的一个分支, 贯穿于水电工程建设的始终, 是水电建设的先导与基础。主要内容包括平面与高程控制测量、地形测量、专题信息提取与制图、河道断面与水库淹没测量、施工放样测量、变形观测和面积量算等。根据建设阶段的不同, 内容各有侧重。

规划设计阶段的测量工作 ①规划阶段的测量工作侧重全河流或河段的中、小比例尺地形测图和制作影像图、纵横断面测量、水文站网联测及其它物理信息获取、编制专题图等, 并为上述工作而进行沿河平面与高程控制网的测量。②可行性研究阶段的测量工作侧重水电站工程的枢纽区、水库区的大、中比例尺地形测

图、水库淹没损失各项资料调查、建筑材料场地的测图等,并为工程地质调查提供各种测绘资料。③初步设计和技施设计阶段的测量工作主要进行水电站枢纽区、施工区和建筑材料场地的大比例尺地形测图、水库淹没界线与淹没区的测定、移民和土地赔偿等的测量。

施工阶段的测量工作 根据设计的施工总体布置、建筑物图件及有关文件的要求,布设施工平面和高程控制网,进行建筑物轴线和轮廓线的放样、竣工验收测量,并完成施工过程中的变形观测等。

运行管理阶段的测量工作 主要为工程竣工后的安全运行和水库淤积等所进行的长期重复观测,可为研究建筑物和地壳的位移、沉降、倾斜、裂缝和水库淤积状况,判断建筑物的稳定性、水库运行调度和水库区的崩塌、滑坡及诱发地震预报等积累资料。

发展简史 工程测量历史悠久,远古时期为战胜洪水与兴修水利就开始应用测量。古埃及因尼罗河洪水泛滥,为退水后重划地界而进行测量。中国相传大禹治水时就应用了测量技术,在《史记·夏本纪》中载有“左准绳,右规矩”之说。北宋时曾有人用分级筑堰静水水位法测量汴渠 400 多公里长的沿河高差,用水平望尺、杆尺和罗盘测量地形,并最早发现磁偏角。随着社会发展的需要,工程建设的规模越来越大,对工程测量提出了新要求,促进了工程测量新技术的应用,推动了工程测量理论、技术和方法的完善和成熟,由简单的工具发展为应用精密的仪器。19 世纪 50 年代出现应用地面摄影测量方法编制地形图,20 世纪初出现航空摄影测量,20 世纪 60 年代出现了航天遥感技术、惯性测量系统、电磁波测距和电子计算机技术,特别是在 20 世纪 70 年代以后出现了全站型速测仪、自动安平水准仪、解析测图仪和计算机辅助测图系统等,为测量数字化创造了条件;工程监测中的自动化、远传化也大有发展;全球定位系统(GPS)和测量平差理论等的全面发展,促使传统的测绘学理论、技术和方法的变革,拓宽了研究对象和解决问题的领域,为资源开发和工程建设提供的资料远远超出了传统的范围,从单一的线划图变为影像图、数字地面模型(DTM)或数字高程模型(DEM),供规划设计人员进行计算机辅助设计(CAD)使用;从只提供地面几何信息为主变为可提供一定的物理和社会经济信息。总之,工程测量正以全新面貌进入现代测绘阶段,将在充分利用现代测绘手段和信息源(航片与卫片等)的基础上为工程建设作出新的贡献。

参考书目

李青岳,工程测量学,北京:测绘出版社,1990

(茅玉清)

gongcheng celiang yiqi

工程测量仪器 (engineering surveying instrument) 用于工程建设中测定平面、高程位置和测制断面图、地形图的仪器。按其功能分,有各种通用的测量仪器和施工放样、变形观测的专用仪器。

通用仪器 主要有以下几种。

经纬仪 主要用于测量水平角和竖(垂)直角的仪器。它还具十字丝装置,可作视距测量。中国生产的经纬仪分级系列有:DJ07、DJ1、DJ2、DJ6、DJ15、DJ60。“D”“J”分别为“大地测量”“经纬仪”的汉语拼音的第一个字母。07~60 为以秒表示的一测回水平方向中误差。

水准仪 主要用于测量地面两点间高差的一种仪器。有的水准仪装置水平度盘,在平原地区可作测角仪器之用。中国生产的水准仪分级系列有:DS05、DS3、DS10、DS20 等。“D”“S”分别为“大地测量”“水准仪”的汉语拼音第一个字母。05~20 为以毫米为单位的每公里偶然中误差。

平板仪 用于野外测绘地形图的一种仪器,有大平板仪和小平板仪。

模拟测图仪和解析测图仪 利用航片在室内测绘地形图的仪器,见航空摄影测量。

测距仪 除用于直接丈量距离的钢尺等之外,有可测视距的经纬仪、大平板仪等;还有微波测距仪和光波测距仪(激光与红外测距仪)统称电磁波测距仪;激光干涉仪及测距雷达等。

专用仪器 主要有以下几种。

坡面经纬仪 工程经纬仪上附加副望远镜构成的仪器。用于倾斜巷道标定腰线、上坝边坡放样与削坡、土方验收等。在线路测量中满足控制线型的曲率和纵向坡度,相邻两个变坡间挖填高度可在现场比较,是施工放样中较方便的仪器。

激光经纬仪 用于定线、定位、测量已知角度和坡度等的放样仪器。

激光铅垂仪 用于高层建筑的滑模施工、摆动观测和竖井的掘进导向等的仪器。

激光准直仪 用于挖渠、敷设管道等直线性精密定线和变形观测的仪器。

垂线观测坐标仪 测定垂线中心平面坐标的一种仪器。常用于正(倒)锤线观测,测定建筑物的水平位移。

引张线 用拉紧的金属丝作为基线,以测定建筑物水平位移的设备。由引张线、重锤、浮托等组成。装置光电跟踪设备,可进行自动位移观测。

陀螺经纬仪 由陀螺仪和经纬仪结合一体的仪器。根据其定轴性和进动性,测定真方位角。常用于矿

山、隧道等测量。

(茅玉清)

gongcheng dizhi cehui

工程地质测绘 (engineering geological mapping)

与工程有关的各种地质现象的调查测量工作。通过它可以了解工作区的地质环境,发现与工程建设有关的地质问题,为进一步调查、勘探及试验等专门研究提供条件。工程地质测绘工作一般分三个阶段进行:准备工作、野外测绘及内业整理。

准备工作 ①全面搜集测绘区有关的地形地质地貌、航片、卫片及气象等资料。②按勘察阶段、工程特性及地形地质复杂程度等确定测绘范围和比例尺。③查勘现场后编制测绘大纲。

野外测绘 ①测绘工作方法,根据测区的地质、地形及交通条件布置测线和观测点,选择典型剖面编制地层或岩层柱状图,按测绘比例尺确定地层划分单位。水电工程地质测绘的比例尺分大、中、小三类:1:500~1:5000、1:10000~1:50000、小于1:50000。一般比例尺小于1:5000地质图多用已有资料或遥感地质资料结合现场重点校核、补充编制而成。测绘用的地形底图等于或大于地质图的比例尺,并以选用近期航片绘制的为好。比例尺大于1:5000的测绘,地质点用仪器测定。在测绘过程中随时整理记录和草图。②测绘工作内容。主要有:地层岩性包括岩石种类、地质年代、岩石和岩层的形成顺序、分布、厚度,组成物性质、结构及其变化规律。注意其中的软岩、可溶岩及其夹层,如火山岩喷发间歇风化层,蚀变带,滑石、石墨及绿泥石片岩,以及第四纪岩层中的软土、膨胀土、湿陷性黄土、粉细砂、架空的砂砾石层等的分布。地质构造包括:褶皱的形态及分布;断层的规模、分布、产状、断距、错动痕迹及第四纪活动迹象;不同岩性和构造部位裂隙发育程度及规律。地貌包括:河谷断面、岸坡、阶地、冲沟、洼地、河间地块及分水岭等。物理地质现象包括:喀斯特、滑坡、崩塌、泥石流、风化卸荷等的分布、规模、成因和发展趋势。水文地质包括井泉等地下水露头的分布、补给条件,水位、水质、水温、水量及其随季节的变化规律等。

内业整理 ①清理标本、地质像片及底片,填写标签和说明后配套保存。②整理地质点卡片和素描图。③编制各种汇总表。④绘制地质平面及剖面图。⑤按拟定的提纲编写测绘说明或报告。

(崔诗礼)

gongcheng dizhi jiance

工程地质监测 (engineering geologic monit-

oring) 定期观测工程建筑物地基、围岩、边坡工况和有关不良地质现象变化过程的工作。水电工程建设和运行期间,为了准确预测渗漏、岸坡稳定性、地基沉陷、洞室围岩变形及水库诱发地震等问题,除进行地质勘探和试验研究外,有时需要较长期的观测、监视不良地质现象及其有关因素的动态和变化规律,以便及时采取防护和处理措施。由于水电工程的特殊性和近年来高坝、大库的兴建,工程地质监测技术日趋重要,它不仅是预测险情的有效方法,并成为勘察工作中不可缺少的手段。

监测项目及内容 ①大坝地基的沉陷量、水平位移、坝基应力变化、水的渗透压力及软弱岩层性质的变化。②水库及绕坝渗漏通道的地下水动态。③地下洞室围岩顶部下沉量、周边岩体变形、地下水渗透压力及渗流量。④岸坡滑坍体和蠕动岩体的位移量、裂缝数量和宽度的变化。⑤库岸及坝下游浸没、坍岸、沼泽化、盐碱化及黄土湿陷范围的变化。⑥泄水及溢洪区的冲刷范围及深度的变化。⑦活断层区的地应力、地形变、断裂位移、微震及有感地震等。

监测方法 ①地下洞室围岩变形及应力状态监测常用的有两种方法:一是在选定断面的顶拱及边墙上埋设固定点,随洞室的掘进定时量测两点的相对变形;另一是将多点位移计埋在洞顶及洞壁上的径向钻孔内,孔底设固定点,随洞室的开挖定时观测孔内各测点与固定点的相对位移。钻孔深度根据岩体变形影响范围确定。孔内的测点数,各种仪器不完全相同,目前最多可埋8个点,仪器最好在洞室开挖前、或在掌子面附近埋设,尽可能测到完全变形量。收敛计及位移计种类很多,读数方式有人工、机械和电动遥测等,可根据具体条件选用。洞室围岩应力观测是在围岩内及围岩与支护之间埋设液压应力计,随洞室开挖监视岩体应力的变化。观测断面上的压力计一般是成双或成组埋设,以求得各方向的应力变化值。②岸坡岩体的变位。一是在变位的或可能变位的岩(土)体表面设观测剖面或观测网,定期用测量仪器量测;二是在变位岩土体上的钻孔或探洞内,装置倾斜仪或挠度计,定期量测滑体的各向位移量,同时也可在滑体的拉裂缝上,装设缝隙监测器,定时观测其三个方向的位移量;三是利用遥感技术监测滑动体的整体位移。还有一种地下噪声监测仪,可监听岩上体在应力作用下产生的次声波,预报岩体变形活动情况,该监测仪可在钻孔中埋设,能承受一定的静水压力。③地下水动态观测。利用简便的设备定期观测或用仪器自动、连续记录所观测的井、泉等地下水点的水位、流量、水温等,并定期取样测试水化学成分。在监测地下水的同时,也要观测或搜集与其有关的气象水文资料,供进行系统的水文地质分析时使用。④浸



没、盐碱化、沼泽化、黄土湿陷及冲刷情况的监测、预测,除观测地下水动态外,还以重复测量的方法,监视其变化范围。⑤活断层位移量及地震活动的观测。用精密测量仪器,定期测量大地形变和断层带的相对垂直和水平位移,布设地震台网,监视水库蓄水前后的微震及有感地震活动。

工程地质监测成果 监测成果的可靠性与准确性取决于观测点的代表性、观测时间的适时及系列长短、记录是否准确无误。因此,在观测前要根据地质条件选好观测网点的位置,按时观测,及时整理记录,消除人为或仪器设备的误差,编绘观测项目与时间的关系曲线,保证准确及时预测有关的工程地质问题。

(崔诗礼)

gongcheng dizhi kancha

工程地质勘察 (engineering geological investigation) 为查明工程建筑物区地质条件所进行的地质调查研究工作。由于建筑物类型、规模及重要性不同,对地质条件要求也不同。在工程建设之前,要进行水库区、坝址区以及各水工建筑物区的工程地质勘察,调查它们的工程地质条件,研究各种建筑物对地质条件的适应性及在兴建中可能出现的问题以及处理意见,调查天然建筑材料如混凝土骨料、土坝和堆石坝的土料和石料、防渗土料等,为工程设计、施工提供地质资料和评价。

水利水电工程地质勘察任务和内容 水利水电工程地质勘察是分阶段进行的。大、中型工程可分为规划勘察、可行性研究勘察、初步设计勘察、技术设计和施工图设计勘察四个阶段。①规划勘察主要是调查河流或河段区域地质、地貌、断裂活动性及地震;了解各规划梯级的工程地质条件、近期开发和控制性工程水库、坝址的主要地质问题;普查各梯级所需的天然建筑材料;为规划方案和选择近期开发工程提供地质资料。②可行性研究勘察是查明工程区活动断裂的分布、稳定性和地震活动情况、评价工程场地的区域构造稳定性;调查库、坝区的主要工程地质问题,并做出初步评价;初查工程地区附近可能利用的各种天然建筑材料;为选定坝址和引水线路、初选基本坝型和枢纽布置提供地质依据。③初步设计勘察是查明库区专门性水文地质及工程地质问题和预测蓄水后的变化;查明建筑物区的工程地质条件并进行评价,为选定坝型、枢纽布置、各建筑物的轴线和地基处理提供地质资料和建议;查明导流工程的工程地质条件;必要时进行施工附属建筑物场地工程地质勘察和施工与生活用水初步调查;进行天然建筑材料详查;地下水动态长期观测和岩土体变形的监测。④技术设计施工图设计勘察主要是

进行工程地质专题研究;查明附属建筑物工程地质条件;通过施工地质工作核实前期资料,配合设计调整及优化工程设计;提出施工和运行期工程地质监测的内容、布置方案和技术要求的建议,分析施工期地质监测资料;必要时进行天然建筑材料复查。

工程地质勘察方法和程序 工程地质勘察方法包括工程地质测绘、勘探(物探、铅探、井硐探)、工程地质试验与水文地质试验、长期观测和监测等。①工程地质测绘是勘察工作的基本方法,可全面了解工作区的基本地质条件,为合理布置勘探工作提供依据。各种比例尺的工程地质测绘常尽量利用卫片、航片、陆摄像片等遥感资料进行地质解释和制图。②物探是一种工效高、装备轻便的勘探方法。应用综合物探技术可探测覆盖层厚度及分层、岩体风化深度及分带、隐伏断裂带、滑坡、喀斯特及地下水埋藏深度、不同物理性质的岩层界面、岩土物理力学参数以及了解洞室围岩和坝基岩体松散范围及检查灌浆效果等。③钻探是勘察工作的主要手段,对查明地下一定深度的岩层、断裂、喀斯特及地下水等情况是不可缺少的。小口径金刚石钻进技术的应用,可提高钻探质量和加快钻进速度。尤其是深孔采用绳索取芯钻进,提高工效更加明显;大口径钻探已成为探查软弱夹层和缓倾角断裂的有效手段。目前国内外钻探技术都在向高速、自动化方向发展。④井硐探也是常规的勘察方法,多用于探查河谷岸坡地带的工程地质条件及风化卸荷带、断裂与软弱夹层、喀斯特通道系统等专门地质问题。井、硐并可作为岩体原位测试的场地。⑤工程地质试验包括室、内外的岩(土)体物理力学试验、岩(土)体变形试验、岩(土)体强度试验及岩体应力测试等方面,为评价工程地质条件以及设计、施工提供参数。⑥水文地质试验主要包括测定岩(土)体渗透性参数的抽水试验、压水试验、注水试验以及地下水流速、流向试验等。为设计和研究防渗措施提供基本依据。⑦长期观测和监测是研究某些专门地质问题的重要方法,如地下水动态观测,岸坡变形、地基沉陷等监测,以验证地质评价和预测的准确性。

工程地质勘察工作程序是按照由区域到场地,由地表到地下,由一般性调查到专门性问题研究,由定性到定量的原则进行。一般先进行地质测绘而后按顺序是勘探、试验及长期观测和监测。测绘是先作小比例尺的后进行大比例尺的。勘探一般是先做物探,在此基础上再布置钻探与井硐探。岩土试验是先以室内工作为主,而后进行必要的室外大型试验。长期观测和监测一般是在可行性研究阶段及以后的勘察阶段中进行,有些项目可延续到工程运行甚至更长的时间。

工程地质勘察成果 根据中国 SDJ14-78《水利

《水电工程地质勘察规范》规定。各阶段工程地质勘察结束后,提出相应阶段的工程地质勘察报告,报告由文字部分、附图及附件三部分组成。报告的内容与各阶段的勘察任务相适应,综合反映和论证勘察地区的工程地质条件和主要工程地质问题,做出工程地质评价。附图应清晰实用,内容必须与报告互相印证。

(崔诗礼)

gong cheng dizhi pingjia

工程地质评价 (engineering geological evaluation)

通过全面分析工程地质环境,对兴建工程建筑物的工程地质条件所作的估计。由于建筑物的规模、类型不同,对地质条件的要求也不同,因此工程地质评价结合建筑物的具体要求进行。其次,由于不同设计阶段地质勘察工作深度不同,工程地质评价的深度在不同阶段也有所不同,一般是定性和定量评价并重,随着工作的深入,逐步提高定量评价的精度。水电工程地质勘察中主要工程地质问题的评价有:区域构造稳定性评价、渗漏问题评价、坝基抗滑稳定工程地质评价、土的地震液化问题评价、岩土体渗透稳定问题评价、地下建筑物围岩稳定问题评价和边坡稳定问题评价等。

区域构造稳定性评价 对水工建筑物在未来运行期间可能遭受到的地质构造和地震的影响所作的估计。收集以坝区为中心,300 km 为半径范围内区域的地质、地震资料,初步分析坝区周围地区的区域构造稳定性。

活断层的研究 研究坝区附近区域性断层的活动性,确定活断层(晚更新世以来有过活动的断层)的分布与活动年代。坝址尽量避开具活动性的区域性断层,并与其分支断层也保持一定距离。工程建筑物原则上不布置在活断层上,特别是晚更新世晚期(3.5 万年)以来有过活动的活断层。对活断层的危险性根据其性质、规模、活动的强度和频度进行估计。

地震危险性分析 确定潜在震源位置和选择震源模型、计算各震源不同震级地震的发生率、确定从震中到建筑场地的衰减规律、分析在一定超越概率水平下库坝区的地震危险性(地震烈度、地震动参数)。设计年超越概率一般按工程重要性选取。

水库诱发地震 预测地震的性质、地点和强度。构造型水库诱发地震一般发生在构造应力集中部位,可用库区构造地震的可能震级上限作为其震级上限,或用断层破裂长度统计法估算震级上限。喀斯特坍塌气爆型水库诱发地震多发生在喀斯特发育地段,其震级上限一般用地质地震类比法估计。

渗漏问题评价 包括渗漏边界条件及渗漏量计

算。

渗漏边界条件 一般在邻谷高于水库水位、水库与邻谷或下游间存在高于库水位的地下水分水岭或库底分布有连续的隔水层时不会发生水库渗漏。除上述情况外就需要调查古河道、强透水岩层、大断层等强透水带与库水接触的范围、强透水带的分布、性质、透水性、在邻谷或下游出露的位置和高程。水库与下游间存在单薄山体时需进行与强透水带调查内容相似的调查工作,特别是单薄山体与库水接触范围和山体的透水性。

渗漏量计算 根据调查所得的渗漏范围、渗透比降、渗径、各类岩土体的渗透系数,利用地下水动力学方法计算渗漏量。岩体中裂隙水与土体中孔隙水的运动状态不同,要根据情况选用适宜的计算方法。也可采用不同的电模拟方法求取渗漏量。

水利水电工程渗漏问题的评价中比较突出的是喀斯特渗漏问题评价。

喀斯特渗漏问题评价 喀斯特渗漏是指库水通过喀斯特通道向邻谷和下游的渗漏以及通过坝基和绕坝的渗漏。一般依据该地区的基本地质条件进行评价,这些条件有:①隔水层或相对隔水层的空间分布、厚度。②地下水和河水的补排关系,地下水分水岭的位置、高程和水动力条件。③喀斯特的发育规律、发育强度、喀斯特洞穴系统的规模、空间分布、连通和充填情况等。

不具备渗漏的地质条件 ①邻谷的河水位高于水库蓄水位(悬挂于地下水位以上的河流不属于此种情况)。②水库周边有连续、稳定、可靠的相对隔水层或隔水层,且分布高程高于水库蓄水位。③河间地块存在高于水库蓄水位的地下水分水岭(存在多个喀斯特含水层时,各层的地下水位都高于水库蓄水位)。

具备渗漏的地质条件 ①水库蓄水位高于邻谷河水位,河间地块喀斯特发育,地下水分水岭低于水库蓄水位或没有地下水分水岭,没有可靠隔水层或相对隔水层阻隔,或隔水层已受构造破坏。②坝址上下游河流流量反常或河水补给地下水。③下游河床有较大落差,与坝址之间无隔水层或隔水层已被破坏,且喀斯特发育。

喀斯特渗漏的计算 目前还没有公认的可靠方法,通常以地下水动力学方法为主进行估算,辅以水量均衡法和水文学方法。具有统一地下水面的喀斯特裂隙水地区可用地下水动力学方法。喀斯特管道水为主的地区可用水量均衡法。

坝基抗滑稳定问题评价 包括分析坝基滑移的边界条件、确定计算参数和进行稳定核算。

滑移边界条件 指滑移面、侧向切割面和临空面。滑移面多为倾角小于 30°的软弱结构面。侧向切割面是

可与滑移面组合构成滑移体的各种中、陡倾角结构面。临空面是坝下游可供滑移体自由滑移的空间,如地形上的沟谷、溢流冲刷坑或易于压缩变形的断层带和软弱岩层等。按照滑移面的位置,坝基滑移破坏分为沿坝体混凝土与岩土体接触面的滑移;沿坝体混凝土与岩土体接触面附近的软弱面破坏的浅层滑移;沿一定深度处的软弱面破坏的深层滑移等。滑移边界有以下几种组合情况:①倾向下游的缓倾角滑移面、侧向切割面与下游临空面的组合;②倾向下游的缓倾角滑移面、侧向切割面与坝趾附近倾向上游的缓、中倾角结构面的组合;③倾向上游的缓倾角滑移面、侧向切割面和坝踵附近横河向的上游切割面的组合;④拱坝坝肩岩体内平缓倾角滑移面、侧向切割面与下游临空面的组合等。

计算参数的确定 滑移面和侧向切割面的抗剪(断)强度参数可选用抗剪试验峰值强度的平均值(剪摩公式)或小值平均值(纯摩公式)为基础,并考虑试验的代表性、滑移面和侧向切割面的起伏程度、夹泥的厚度、性状及时间效应、水库蓄水后地质条件恶化的影响、基坑开挖形态和地基处理效果等因素作适当调整。

稳定核算 中国 SDJ21-78《混凝土重力坝设计规范》(试行)对坝体抗滑稳定安全系数的要求是在荷载的基本组合和特殊组合情况下,按纯摩公式不小于 1.10~1.00;按剪摩公式不小于 3.0~2.3。

地震液化问题评价 土在静力或动力作用下由固体状态转化为液体状态的过程称为液化。如果产生了工程上不能容许的变形量时称为液化破坏,主要表现为孔隙压力上升,抗剪强度(或剪切刚度)降低并趋于消失,引起的喷水冒砂、丧失承载能力或发生流动性变形。

容易液化的土 地震时常见的发生液化破坏的土为粘粒(粒径小于 0.005mm)含量小于 15%(少数可达 20%)的饱和土。其中主要是饱和无粘性土(塑性指数 $I_p < 3$)和少粘性土(塑性指数 $I_p \geq 3$),包括粘粒含量小于 3%的饱和的砂、粉砂、粉土和粘粒含量大于 3%的饱和的砂壤土、粉质砂壤土、轻粉质砂壤土。

土层液化的判别 在勘察过程中分为初判和复判两个阶段。初判主要根据已有资料或通过较简单的测试,通常认为第四纪晚更新世(Q_4)或更老的土层、粒径大于 5 mm 的颗粒含量百分率大于 70%的土、地下水位以上的非饱和土可判为不液化的。复判是在初判基础上对可能发生液化的土层再作进一步鉴定,一般采用剪切波速、标准贯入试验锤击数、相对密度和相对含水量及液性指数等为标准作判定,或进行专门性试验研究。

渗透稳定问题评价 渗透变形是土体在渗流作用下发生破坏的统称,一般可分管涌、流土、接触流失和

接触冲刷四类。以抗渗允许比降作为判别的标准(见渗透变形)。

地下建筑物围岩稳定问题评价 基本上可分理论分析法与围岩分类法两大类。

理论分析法 在查明地下建筑物地质条件的基础上,依据岩体力学属性的不同,分别采用与之相适应的理论与方法对围岩的稳定性和岩石压力作出评价。当围岩为比较完整的坚硬岩体,特别是埋深较大时,采用弹性理论或弹塑性理论方法。当围岩有多组贯穿性结构面切割,呈不稳定块体时,采用极限平衡理论方法。当围岩为破碎岩体或松散土体时,采用散体理论方法。计算中所需的岩体物理力学参数如密度、变形模量、抗剪强度、地应力及地下水位等,在不同设计阶段分别以工程类比法或试验室及现场测试确定。

围岩分类法 随着喷锚支护同时发展起来的一种评价方法,它是根据工程实践所形成的围岩分类表对围岩的基本因素逐项进行评分,最终以总评分确定围岩类别。已有的围岩分类大多将围岩分为五类,即稳定(I)、基本稳定(II)、稳定性差(III)、不稳定(IV)和很不稳定(V),并分别附有喷锚支护设计参数的参考数据。中国有些部门已制订了本部门的围岩分类。国际上使用较广的有 Q 系统分类(Q-SYSTEM)和地质力学分类(RMR SYSTEM)。围岩分类的基本因素是岩石强度、岩体完整程度、结构面状态及其走向和建筑物轴线间的夹角、地下水和地应力等,通常需做一些现场测试工作。在初期勘察阶段地质资料较少时,也可以根据岩石强度、岩体完整程度、岩体结构等对围岩定性地进行初步分类进行评价。

边坡稳定问题评价 包括进行边坡分段、明确可能失稳边坡的边界条件和边坡稳定性分析。

边坡分段 区分出需进一步研究的可能失稳地段,如:①软弱岩层组成的、风化或卸荷深度大的、坡脚存在软弱岩层(易风化、易崩解的泥岩、已有煤矿在开采的煤系地层等)的高陡边坡。②已有变位迹象(拉裂缝、小错台、岩层产状非构造性异常、岩体蠕动现象等)的边坡。③位于河流凹岸处的顺向坡,受河流冲蚀、水库回水、渠道渗水等影响的高土质坡和老滑坡。④植被近期被大量破坏的土质陡坡。⑤倾向坡外、倾角小于边坡坡度的软弱结构面发育的边坡。⑥存在由结构面组合切割形成的向坡外滑移的不稳定岩体的边坡等。

边坡的边界条件 除临空面外包括滑动面和侧向切割面,重点是研究其延伸情况、组合及其性状。滑动面一般都取样作室内抗剪试验,影响重大的滑坡体还进行现场抗剪试验。

边坡稳定性分析 有历史分析法、力学验算法和工程地质类比法,一般常进行相互验证。①历史分析法



是应用边坡变形、破坏规律推断边坡目前所处的演变阶段、演变的主导因素、发展趋势、变形和破坏方式。②力学验算法是应用岩石力学或土力学的理论和方法,分析计算边坡在给定条件下的稳定性,目前一般采用刚体极限平衡法。计算剖面的位置和采用的参数对成果影响较大,需仔细选择。通常,抗剪强度均在试验资料的基础上,结合具体地质情况作一定调整,以具备充分的代表性。另外,稳定性评价时要根据边坡失稳后的影响大小和对边坡地质条件的了解程度选用不同的安全系数值。③工程地质类比法是采用较广的一种方法。使用中需注意的是类比工程的各方面相似性愈高,所得结果也愈可靠。

参考书目

成都地质学院张倬元,王士天,王兰生编著,工程地质分析原理,第一版,北京:地质出版社,1981

(陈祖安)

gongcheng dizhi shiyan

工程地质试验 (engineering geological test)

为取得工程设计和进行地质评价所需的岩土物理力学性质参数而进行的试验。它是工程地质勘察的手段之一,用以了解岩土物理力学性质,以及在载荷作用下的变形过程及破坏机制,为研究建筑物地基、洞室围岩、岸坡变形及稳定等工程地质问题提供基本参数。工程地质试验基本分室内试验和现场原位测试。由于水电工程建设需要,地质力学模型试验也在发展并日趋规范化。

室内试验 从野外采集一定规格的具有代表性的样品,在室内进行各种项目的试验。主要有岩土成分(矿物、化学及颗粒成分),物理性质(比重、密度、吸水率和含水量),水理性质(崩解、湿陷、溶滤及渗透),力学性质(抗压强度、抗剪强度、压缩及变形特性)等。

土的力学试验有:①土的压缩试验。将原状土样放在有侧限容器内逐级加压,不允许土体侧向膨胀,测定各级压力与土压缩量之间、土样压缩与时间及卸荷过程中压力与回弹之间的相关性,也称有侧限压缩。若压缩时允许侧向膨胀,称无侧限压缩,如现场地基载荷试验。土的压缩指标可用于计算地基沉降,评价地基变形。②直剪试验。在不同的垂直压力下,施加水平剪切力进行剪切,求得破坏时的剪应力,根据库伦定律计算土的抗剪强度参数。③土体三轴试验。在不同围压条件下,对样品施加轴向压力,使土体发生剪切破坏的一种试验,可用莫尔-库伦定律求土体强度。④土体击实试验。样品放在标准击实仪中,在一定击实次数下,测定土的密度和含水量的关系,从而确定土的最大干密度与相应的最优含水量。⑤土的变形和孔隙水压力,可通

过土的动力强度试验测定。

岩石力学性质试验有:①抗压强度。指岩样在单轴或三轴压力下发生破坏时的强度,其值等于岩块破坏时的最大压应力。②抗拉强度。指岩样在单向拉伸条件下发生破坏时的强度。③岩石抗剪强度。岩石抵抗剪切滑动的能力,根据莫尔-库伦强度理论,用凝聚力 and 内摩擦角表示,是水电工程岩石力学的重要指标之一。近年来,已广泛采用中型剪试验研究其强度,即在现场取 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 或 $40\text{ cm}\times 40\text{ cm}\times 40\text{ cm}$ 的岩样,按常规方法进行试验。④岩石变形。岩样在室内进行单轴或三轴压缩试验,其结果可了解岩石的应力-应变关系,也可用岩石三轴仪直接测定岩石的弹性模量。

现场试验 原位大型试验具有试件大,能保持岩土体天然状态的优点,可更确切地研究岩体工程地质特性及其变化规律。具体的试验地点与方法,可根据工程需要、工程地质条件、岩土体的特性而定。现场原位测试有:岩土体物理力学性质试验、岩体应力测量,以及为改善岩土体性能的试验等。主要有:①土体变形试验。通常采用静力载荷法进行,即在一定面积的承压板上向地基土逐级施加荷载,观测地基土的变形、变形与时间的关系,确定地基承载力。②土体旁压试验。在预钻的钻孔中放入可扩张的旁压仪(橡皮或金属加筋橡胶膜),对孔壁施加压力,测定土体发生的相应变形的一种测试方法。该试验可以确定地基土承载力及旁压模量等指标。③土体的抗剪试验。常用的方法有两种,一是浅坑中的大型剪切试验,另一是钻孔中的十字板剪切试验。前者适用于含砾粘性土,风化的残坡积层及砂卵石,后者可用于淤泥或淤泥质软土。④土体的标准贯入试验。用 63.5 kg 的穿心锤,以 0.76 m 的自由落距,将标准贯入器打入孔底土层 0.3 m 所记录的锤击数即标准贯入击数,可判别土体的密实程度,一般用于砂性土和粘性土。⑤静力触探及动力触探。根据探头压入土层的阻力,测定土的变形模量和承载力。⑥岩体变形试验。通过刚性或柔性承压板将载荷逐级加在岩基面上,量测其变形。在隧洞内以径向液压法及水压法施加径向载荷,量测岩而的变形,推求岩体单位抗力系数和变形模量等参数。⑦在工程勘察设计中广泛应用动力法研究岩体的弹性特征,如用地震波、声波及超声波法,测定弹性波在岩体中的传播速度,求取岩体的弹性模量及研究岩体的完整性。⑧抗剪试验。目前常做的有混凝土与岩体、岩体中的软弱结构面及岩体本身的抗剪试验。⑨岩体初始应力测试是研究岩体初始应力和二次应力的状态、方向和大小的手段,测试方法很多,各有利弊,可根据测试目的和具体条件选择。目前常用的有孔壁、孔底和孔径应变法,洞壁表面应力解除法和应力恢复法。



地质力学模型试验 用与实际岩土体力学性质相似的材料,制成块体及结构面的模型,模拟不连续的岩土体,对模型施加工程载荷或模拟开挖,观测模型的应力分布、变形和破坏过程。中国水电系统有些单位已开展此项工作。

此外,也采用数值模拟法研究工程区的地应力场,采用光弹试验研究工程岩体的应力问题。

(崔诗礼)

gongcheng dizhitu

工程地质图 (engineering geologic map)

反映工程区与建筑有关的地质现象的图件。如岩土类别和构造断裂的分布、水文地质和物理地质现象以及地貌等。它是分析建筑物区工程地质条件和进行工程设计的基础资料。对工程地质图的要求一般包括比例尺、用途、种类、内容等。

工程地质图的比例尺和用途 图的比例尺分大、中、小三类。小比例尺地质图 1:500000 或更小,多用于流域规划,1:200000~1:100000 多用于河段规划;中比例尺 1:50000~1:10000 主要用以反映库区及区域性地质或工程地质条件;大比例尺指大于 1:10000 的,主要用于选择和布置水利工程建筑物。

工程地质图的种类和内容 一般有综合性工程地质图、专门性工程地质图、工程地质分区图、剖面图及柱状图五类。①综合性工程地质图。一般反映地形地貌、地层岩性、地质构造、物理地质现象及水文地质的有关内容。②专门性工程地质图。一般是突出反映某方面具有特殊意义的地质现象。③工程地质分区图。根据综合地质因素概括的反映各区段工程地质条件及其相对优劣程度。④剖面及柱状图。反映地表以下一定深度的地质构造、地层层序、接触关系、风化深度及地下水埋深等。

水电工程地质图的种类和内容 ①区域地质图、构造纲要图、构造体系图、地震震中分布图及地震烈度区划图是反映工程建筑物区及其周围地质构造特征及历史地震情况,用以分析评价建筑物地区构造稳定条件。②库区地质图、喀斯特水文地质图、滑坡分布图、坍岸范围及浸没分区图是评价水库渗漏、库岸稳定、淤积冲积物质来源及浸没程度的图件,也是移民安置、工程处理和防护的依据。③坝区(段)、坝址地质图是布置坝址勘探和选择坝址、坝线及研究坝基稳定、开挖和处理措施的基本资料。④发电、引水及泄洪建筑物区地质图是用以评价及选择厂房、引水线路,合理布置工程建筑物的基础资料。⑤天然建筑材料产地分布图、料场平面、剖面图反映各种建筑材料产地与建筑物的相对位置、材料的埋藏、开采条件及储量等情况。⑥综合地

层柱状图反映地层顺序、沉积韵律、接触关系、岩浆活动等,可指出软弱层、隔水层及喀斯特化岩层层位,并可概略的说明地质发展史和工程地质特性,指导工程地质测绘。

工程地质图的绘制 一般是以北为图的正上方,并标出经纬度,只有在严重影响图件的内容时方能斜置,但也应明显的标出北的方向。纵剖面图是由上游向下游或自左向右绘制;横剖面图是面向下游由左向右绘制。为便于阅读,图例都是按地层、构造、地貌、物理地质现象、水文地质、勘探点等分类依次排列,其中地层是从新到老和先沉积岩依次为变质岩和岩浆岩。各时代地层或岩性按惯例着色并标明地层或岩性代号。图幅布置尽量紧凑,利用面积不小于 75%,剖面的纵、横比例尺尽可能一致,如用变态比例,纵向一般不大于横向的 5 倍。

(崔诗礼)

gongcheng dizhixue

工程地质学 (engineering geology)

研究人类工程活动与地质环境相互作用的学科。工程地质工作的任务是选择在地质条件上相对最优的工程建筑地区或场地;阐明工程建筑区或场地的地质条件,进行定性和定量的工程地质评价;预测工程建筑物兴建和运用过程中地质条件的可能变化,为研究改善和防治不良工程地质条件的措施提供依据;调查工程建筑物所需的天然建筑材料等。工程地质学是地质学的一个分支。地质学的基本学科如普通地质学、岩石学、地貌学、第四纪地质学、构造地质学、动力地质学等是工程地质学的基础。此外,由于研究岩土体的性质和稳定的需要,工程地质学与水文地质学、岩石力学、土力学和工程地震学等有密切的联系。近年来迅速发展起来的岩土工程,在研究内容方面与工程地质学有一定的交叉。

基本内容 包括 4 个部分:①工程岩土学。研究岩土体的工程地质性质,探讨岩土工程性质的形成和变化的规律。②工程动力地质学。研究与工程有关的动力地质现象,探讨其演化规律和防治措施。③工程地质勘察。根据各勘察设计阶段的要求,调查建筑物区及场地的工程地质条件,为工程设计提供工程地质依据。④工程地质分析及评价。在分析工程活动与地质环境相互作用的基础上,对建筑物区及建筑物地基可能出现变化的各个方面的性质、规模和程度作出估计,为研究可能的防治措施提供依据。

基本研究方法 ①自然历史分析法,即地质分析法。通过调查分析,确定地质体目前正在经受的地质作用的阶段后,可利用地质作用的发生、发展和终结的已

知规律对地质问题作出趋势性的判断。所得结果是定性的,但往往对工程的规划、选点等布局和下一步地质勘察工作的安排有重要的指导意义,同时也是进一步进行定量评价的基础。②计算-模拟法。通过对自然条件的简化,采用一定的公式进行数学计算分析,或者在实验室或计算机上对所研究的地质问题进行物理模拟或数值模拟。模拟法的优点是能在短时间内重现所研究问题的全过程或局部,了解作用机制,给出定量的结果,是目前正在发展中的一种方法。由于自然界情况复杂,目前还不能做到完全模拟现场条件,因此,使用其结果时还需要结合实际情况综合考虑。③工程地质类比法,即工程经验法。通过与类似地质条件的类似工程实施结果的比较,判定所研究工程地质问题的可能状况,并据此采取工程措施的经验方法。在实际工作中,上述三种方法常结合使用,相互补充。

水电工程地质研究的主要问题 ①区域构造稳定性。断层的活动性,特别是活断层的情况与最后一次活动的年代,对工程的可能影响和危害。区域地震地质背景、地震活动情况,进行地震危险性分析,确定建筑区的地震基本烈度和地震动参数。诱发水库地震的可能性,预测可能的震中位置和震级。②岩土体的变形和稳定。包括大坝及其它建筑物地基承载能力和变形,大坝坝基、坝肩岩体的抗滑稳定,自然及人工边坡岩土体的稳定(包括浅洪冲刷区的边坡稳定),地下洞室围岩的稳定和岩爆、水库的坍岸等。③渗漏和渗透稳定。包括水库渗漏,特别是岩溶渗漏;由于水的渗漏引起的库周及渠道两侧的浸没;坝基及绕坝渗漏的范围、渗漏量与扬压力及其对大坝和坝基(肩)岩体稳定的影响;第四纪松散地层及断层、破碎带、节理裂隙及岩溶充填物在压力水作用下的渗透稳定问题。④天然建筑材料的调查等。

水电工程地质的主要研究手段 ①遥感。常用的有可见光、光外、红外和微波扫描及摄影,除用于一般地质解译外,还可用来探寻水下泉水出露点(溶洞或暗河出口)等。②工程地质测绘。它是工程地质最基本的工作。通过对地质现象的观察、描述和量测,并按一定的比例尺编制成工程地质图,用以指导勘探、试验和专门性勘察工作。③工程物探。应用地球物理学的原理,通过研究由于物理性质差异而引起的天然或人工地球物理场的变化,推断地下地质情况,或直接测定所需的岩体物理性质参数。主要方法有电法和地震勘探,弹性波测试、测井、重力、磁法和放射性勘探等。④勘探。钻探是用钻机在岩土体内钻孔,采取岩心或土样,并进行水文地质试验,是了解地下地质和水文地质条件最常用的方法。平洞常布置在坝肩、隧洞进出口及地下洞室位置上,了解斜坡的覆盖层厚度、风化带和卸荷带及

岩体状态。竖井常用于调查缓倾角的构造和软弱结构面以及第四纪地层的组成。⑤岩上试验。岩土物理性质、矿物和化学成分、水理性质和力学性质的测定和试验,以便确定计算用的参数,论证建筑物地基、地下洞室和边坡的岩土体稳定条件。⑥水文地质试验。包括岩土体水文地质参数和地下水运动特征的测试。常规的野外试验有钻孔压水、抽水和注水试验;试坑注水试验、地下水流速与流向测定和岩溶通道的连通试验等。室内渗透试验常在勘察初期用于均质土层。⑦观测和监测工作。它是工程地质勘察过程中或工程竣工后根据需要布置的,一般包括地下水动态、岩土体变形(位)和地质构造活动性三部分。地下水动态观测内容通常包括水位(压)、水温、水质和流量。岩土体变形观(监)测通常包括建筑物地基、边坡和地下洞室围岩的应力、位移、变形、倾斜、沉陷和渗压等。地质构造稳定性观测包括地应力、活断层的位移、地倾斜和地震活动等。

工程地质学的发展 20世纪初期,为了适应兴建各种工厂、水坝、铁路、运河等大型建筑物的需要,地质学家开始介入解决大型建筑物中与地质有关的工程问题。20世纪初期,第一次出版了“工程地质学”专著,工程地质开始成为一门独立的学科,工程地质勘察成为大型工程建设中不可缺少的一部分工作。以后较长一段时间内,工程地质工作仍着重于一般地质构造和地质作用的调查,以认识自然为主,对岩体的研究停留在定性的描述和将岩体视作连续体对待的阶段。50年代至60年代,各国先后加强了岩体结构的研究,强调岩体内断层、节理裂隙等结构面的作用和将岩体视作非连续体对待。奥地利的L. 缪勒(L. Muller)等创立的萨尔茨堡学派是这方面的先驱之一。中国谷德振教授及其领导的中国科学院地质研究所工程地质研究室于这一期间创立的“岩体工程地质力学”也是这方面的一个代表。目前,工程地质学有更加密切结合专门目的发展不同分支的趋势,已经出现了区域工程地质、环境工程地质、海洋工程地质、矿床工程地质等分支学科。中国已积累了在各类岩性地区进行水电工程地质工作的经验,建立了一套比较完整的工程地质勘察规程规范,并研究了一些新技术,如无固相冲洗液金刚石覆盖层钻进技术,可取出近似原状的第四纪松散地层的样品(包括砂样);制定了中国水电地下工程围岩分类;调查总结了软弱结构面和夹层的工程经验,对其在工程建筑中的危害性给予了足够的重视;认真研究了岩溶发育条件和规律;系统总结了复杂地基上建高坝的勘察经验。

参考书目

成都地质学院张俤元主编. 工程地质勘察. 第一

版,北京:地质出版社,1981

(陈祖安)

gongcheng dizhi zuanlan

工程地质钻探 (engineering geological drilling) 利用机械设备或工具,在岩(土)层中钻孔,并取出岩(土)芯(样)了解地质情况的手段,简称钻探。它是工程地质勘察的一种勘探方法,目的是了解与土工建筑物(坝、隧洞、厂房等)有关的工程地质和水文地质问题。钻探一般是在工程地质测绘和物探获得一定资料的基础上,为进一步探明地下地质情况而进行的。目前它仍是水电工程地质勘察工作的主要手段。钻进方法及机具种类较多,视其具体任务的需要采用。按钻进方式可分冲击钻进、回转钻进和冲击-回转钻进三类。

冲击钻进 利用钻具自重对孔底进行冲击而破碎岩(土)体的一种钻进方法。以使用的动力可分为人力冲击和机械冲击两种。人力冲击一般适用于浅孔和地下水位以上土层的钻进。机械冲击是采用机械向下冲击,适于各类土层钻进。在砂砾石层中钻进,为了获取砂砾石样品,通常采用平阀管钻冲击跟管钻进,还可采用打入法取样,即先将套管打入孔底下约40cm,然后用带活门的套筒,取出砂砾石,再将套管打入,逐次取出砂砾石,直至要求深度。

回转钻进 在轴心压力作用下的筒状钻头用回转研磨方式切削岩石的一种取芯钻进方法。适于各种岩石钻进,通称岩芯钻探。根据钻头研磨材料可分硬质合金钻进、钻粒钻进和金刚石钻进。硬质合金钻进是使用硬质合金钻头,以回转方式切削岩石的钻进方法,一般适用于可钻性分级7级以下的岩石。钻粒钻进是向孔底投入钻粒(铁砂或钢粒),由筒状钢质钻头在一定压力下回转,辗砂破碎岩石的钻进方法,7级以上岩石适用。金刚石钻进是用金刚石钻头以回转方式切削岩石的钻进方法,可钻各种硬度岩石,尤其适用于极坚硬岩石,因取样效果较好对查明断层、软弱夹层等有一定效果。粘土、砂质粘土等塑性土层通常用螺旋钻头;砂、粘土质砂及细颗粒地层一般采用勺形钻头。目前中国水电系统普遍采用全液压式钻机小口径金刚石钻进。随着钻探技术的发展,取芯质量也有所提高。为了减少钻杆升降次数,可采用绳索取芯钻进方法,绳索取芯是一种不提钻具从孔底采取岩芯的方法,可减少钻进的辅助时间,提高钻进效率。

冲击-回转钻进 一种冲击和回转相结合的钻进方法,即钻头在孔底回转破碎岩石的同时,还施加冲击力(人力或机械力)。该方法适用于各种岩土层,尤其深孔或者孔径较大时,钻进效率较高。

水电工程地质钻孔一般要求作到一孔多用,除获取岩芯,抽、压水试验资料外,还根据需要进行物探综合测井、无线电波透视、钻孔电视、钻孔摄影、孔间CT扫描和钻孔原位测试等,为评价岩体质量提供更多的基础资料和定量资料。

(崔诗礼)

gongzuo rongliang

工作容量 (generating capacity) 担负电力系统计划内负荷的电站发电机容量。在水电站的实际运行中,其工作容量随其能量和在系统中的作用不断变化。当水电站调峰运行时,其工作容量在一天内变化很大;汛期,为了充分利用水流的能量,强迫水电站在电力系统腰荷或基荷工作,其工作容量在一天内变化较小。无调节能力或由于综合利用(如航运)要求而不担或少担系统调峰任务的水电站,其工作容量在一天内是不变或变化不大的。

在规划设计中,最有代表意义的是水电站在枯水年中各月(周)中最大负荷日的最大工作容量,尤其是系统供电最紧张的月(或周)中最大工作日的最大工作容量。它是决定水电站容量效益的重要指标。

当担负调峰任务时,在一天中,由于水电站24h的能量集中在尖峰的若干小时发电,故其日最大的工作容量大于其日平均出力,水电站的工作位置越靠近尖峰,两者的差值越大。

工作容量的计算方法如下。

(1)水电站时段(日或周)平均出力与强制基荷(如果有的话)的差值为可调出力。与可调出力相应的时段电量为可调电量。水电站预想出力减去强制基荷的容量为可调容量。

(2)当水电站进行日调节而不进行周调节时,可调出力乘以24为水电站日电量,用日负荷求其峰荷工作容量。

(3)当水电站进行日周调节时,可调出力乘以168为水电站周电量,用周负荷求其峰荷工作容量;或以日电量乘以周调节扩大系数(1.0~1.2,可用试算法求得),换算成最大工作日的电量,用日负荷求其峰荷工作容量。

(4)水电站的峰荷工作容量,可按其日(或周)电量,以其合适的工作位置,在日(或周)负荷电量累积曲线上求得。日负荷电量累积曲线是日负荷与该负荷以下电量的关系曲线。即可按图1所示,在其工作位置的上划分线,与电量累积曲线的交点,向左量与日(或周)电量(或可调电量)相等的横距,得一点U,并由U点向下作垂线,交电量累积曲线于L,通过点L所作的水平线,为工作位置的下划分线,则U与L的纵

坐标差值即为水电站的峰荷工作容量；工作位置上、下划分线与日（周）负荷曲线所包围的阴影部分为水电站各小时的工作容量。工作位置的上划分线愈靠近尖峰负荷，则其峰荷工作容量愈大；若水电站的工作位置在最尖峰，则其工作位置的上划分线为最大负荷处。水电站最大工作容量等于其基荷工作容量与峰荷工作容量之和。

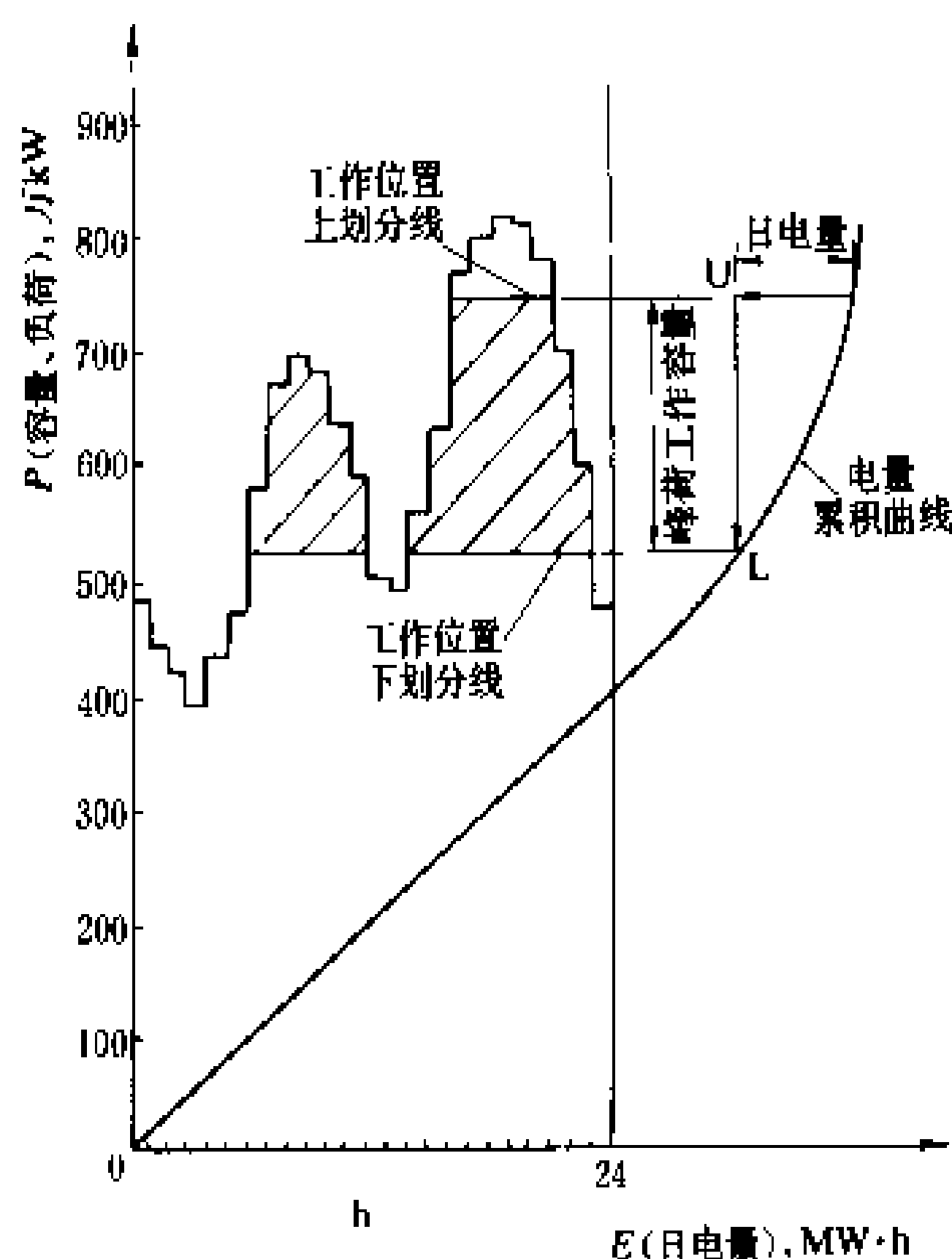


图1 水电站工作位置图

(5) 对已建水电站，工作容量 P 及日（或周）电量 E 为已知，需求其工作位置。则可先扣除基荷的容量

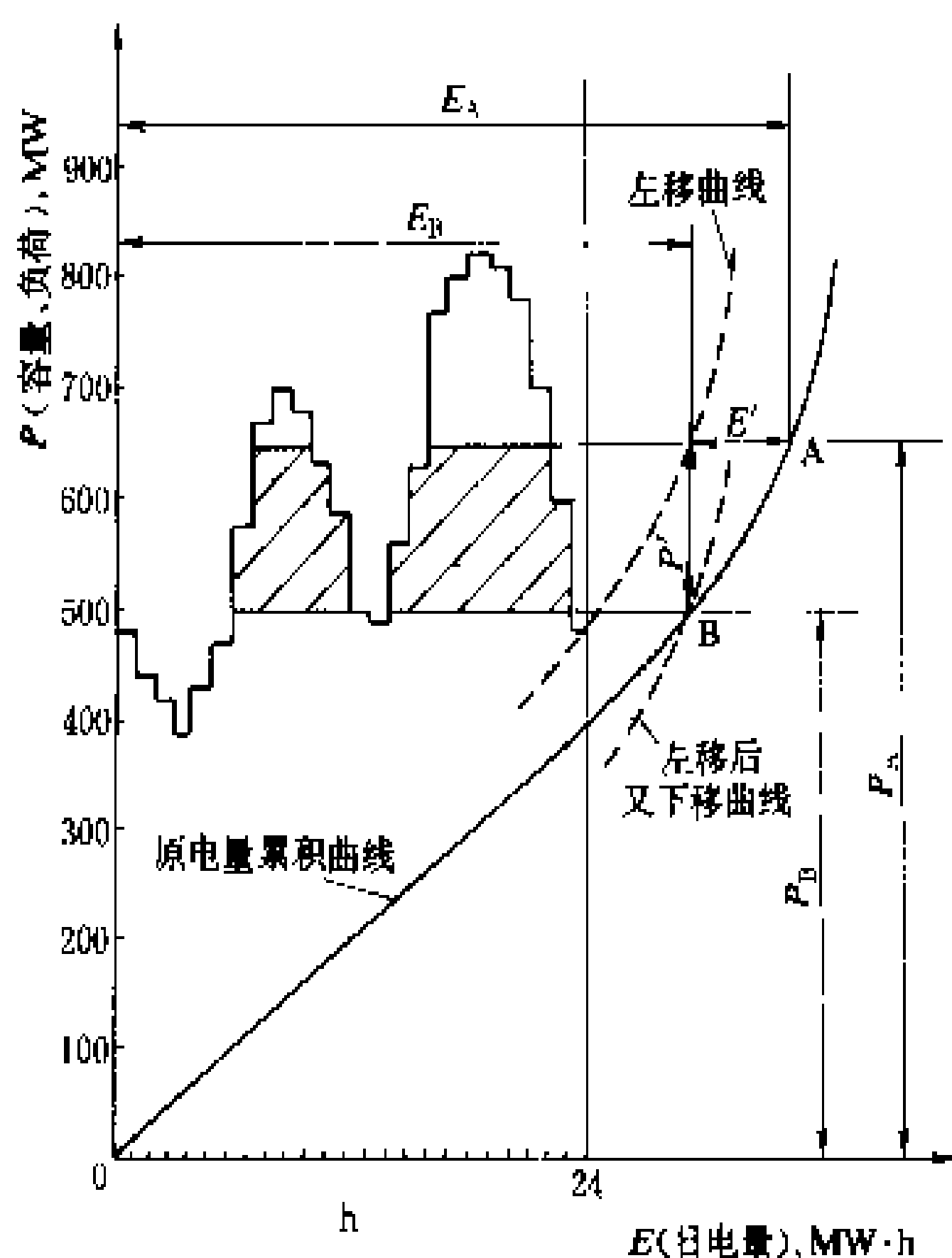


图2 已知工作容量及日（周）电量求工作位置图解

及相应的电量，得可调容量及可调电量各为 P' 和 E' ，然后求其峰荷工作位置。图解法，将原电量累积曲线，分别向左平移 E' ，然后向下垂直移动 P' 作辅助曲线，辅助曲线与原电量累积曲线交于 B，通过 B 作水平线，即为峰荷工作位置的下划分线，由此向上量 P' ，即为上划分线。数解法，可用试算法，找到峰荷工作位置的上、下划分线，各与电量累积曲线的交点为 A、B，使 $P_A - P_B = P'$ ， $E_A - E_B = E'$ 。（见图 2）。在计算机上，则常将日负荷曲线转换为阶梯状的历时曲线，然后用迭代法或按 Z 替代法处理的线性规划法求解。

（伍宏中）

gongzuo zhamen

工作闸门 (service gate) 能起到调节水位，控制水流等作用，并可经常操作的闸门，又称主闸门或控制闸门。具备止水严密、启闭灵活和操作可靠等特性。除船闸人字门、横拉门外，都能在动水条件下进行操作。

设置位置 工作闸门应设置在水工建筑物水流平顺稳定的部位。在有弯道的泄洪隧洞上，要设置在弯道下游一定距离的直段上，以消除弯道引起的不良环向水流。在泄洪隧洞中，工作闸门可设在进口段、中段或出口段。布置于出口段时，门后通气充分，水流流态好，工作可靠；闸门上游为有压流，流速较低；闸门安装、运行和检修等比较方便。在水道中段或进口段设置工作闸门时，注意门后通气，要使闸下水流在泄洪过程中保持明流状态，这样不致产生闸门振动、空蚀等不良后果。为确保工作闸门操作运行的可靠性，在其上游需设置事故闸门和检修闸门，以提供维修条件。

门型 工作闸门的型式较多，一般常用的有平面定轮闸门，平面链轮闸门，弧形闸门，平面滑动闸门等。选型时，主要依据在水工建筑物所在水道上设置闸门的尺寸规模、运行水头、材质以及制造安装和运用条件等因素，综合技术经济指标，论证选用。每扇工作闸门都需有专用的启闭机操作。

（沈德民）

Gongzui Shuidianzhan

龚嘴水电站 (Gongzui Hydropower Station)

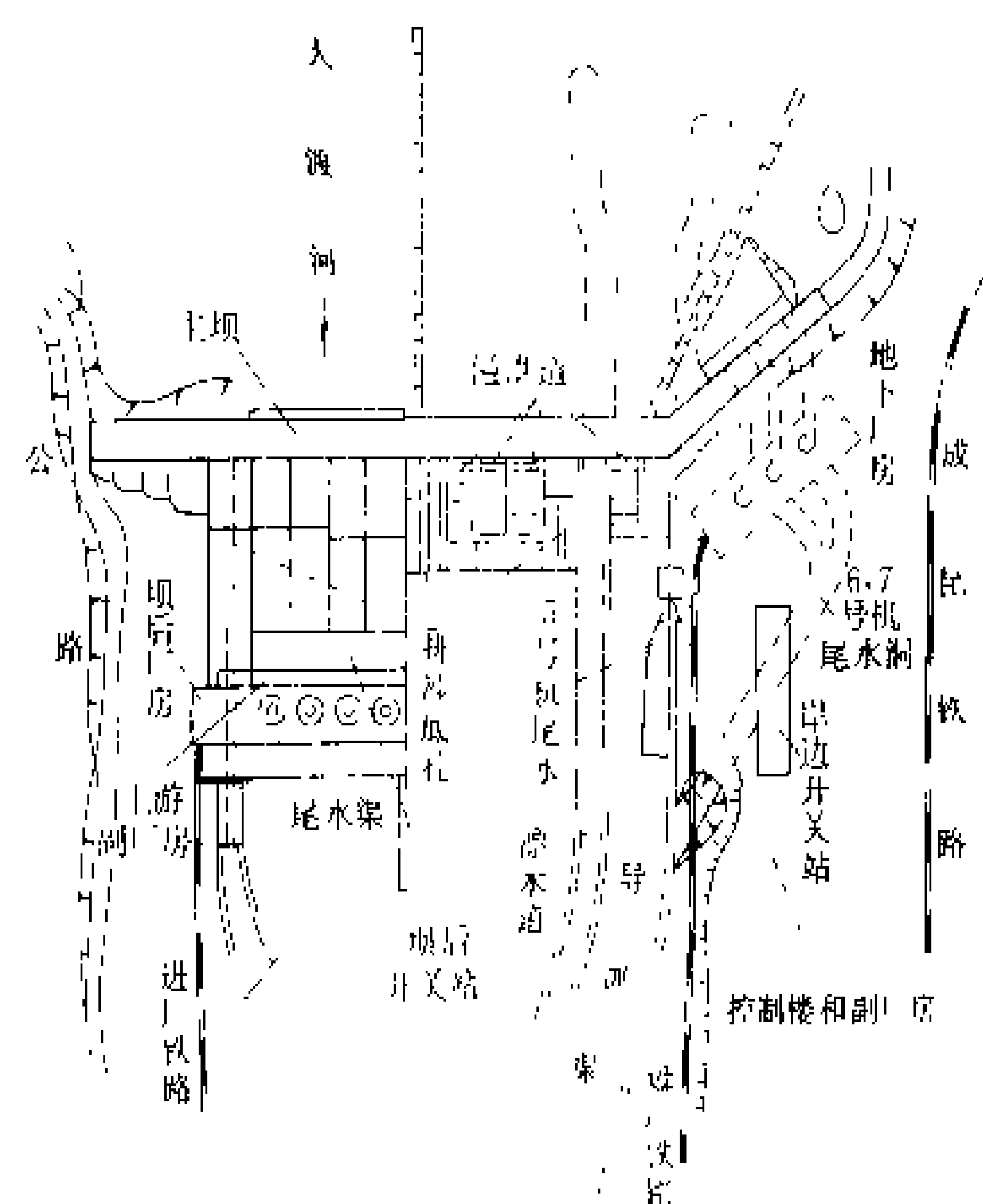
位于四川省岷江支流大渡河上，距下游乐山市 90 km。电站以发电为主。工程按“高坝设计，低坝施工”方案，分两期建设，一期装机容量 700 MW，建有坝后和左岸地下两个厂房。坝后厂房装机容量 400 MW。地下厂房装机容量 300 MW。全厂保证出力 179 MW，多年平均年发电量 34.18 亿 kW·h，以 4 回 220 kV 电压输电线路接入四川电力系统，是系统当前主



要的调峰水电站。主坝为混凝土重力坝，坝顶高程 530.5m，最大坝高 85.5 m。一期工程于 1966 年 3 月开工，1972 年 2 月第一台机组发电，1978 年竣工。二期工程具体方案待定。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 76130 km²，多年平均年径流量 472.5 亿 m³，多年平均流量 1500 m³/s，多年平均年输沙量 2990 万 t。一期工程水库正常蓄水位 528 m，死水位 518 m，总库容 3.39 亿 m³，为日调节水库。大坝按千年一遇洪水设计，洪峰流量 13700 m³/s，水位 528.8 m；按万年一遇洪水校核，洪峰流量 15800 m³/s，水位 530.6m。电站设计水头 48 m，最大水头 53.08 m，最小水头 34.7 m。

枢纽布置 坝址处河谷为“U”形，水面较窄，河床覆盖层深 10~30 m，坝基为前震旦系花岗岩，岩性坚硬。电站枢纽布置见图。



龚嘴水电站枢纽布置示意图

主坝为混凝土重力坝，坝顶长 370 m，左河床为溢流坝段，布置 4 孔表面式溢洪道，左 1 孔，右 3 孔，两者之间设宽 9 m，长 330 m 的漂木道。其进水口处设有活动渡槽，以适应库水位的变化。

右河床为厂房坝段。坝后式厂房内安装 4 台竖轴混流式水轮发电机组，单机容量 100 MW，额定转速 88.2 r/min，水轮机转轮直径 5.5 m，发电机为伞式空冷型，额定电压 15.75 kV，定子铁芯内径 12.8 m。副厂房位于主厂房上游。

地下式厂房位于左岸岸边，内装 3 台竖轴混流式

水轮发电机，机组的型式、结构和容量与坝后式厂房的机组相同。其控制室和副厂房布置在下游左岸岸边。

两个 220kV 屋外开关站，一个位于厂房上游厂坝间，另一个布置在坝下游左岸岸坡上。

为减少泥沙对水轮机磨损，在溢洪道两侧和坝后式厂房安装间的一侧设有泄洪排沙底孔，在左岸地下厂房进水口处设有拦沙坎。

泄洪设施 溢流坝段的左侧有 1 孔溢洪道，堰顶高程 506 m，孔口宽 12 m，高 22 m，最大泄量 3000 m³/s。右侧有 3 孔溢洪道，堰顶高程和孔口尺寸与左侧相同，最大泄流量 9000 m³/s。泄洪排沙底孔：左岸 2 孔，孔口宽 5 m，高 8 m，底坎高程 472 m；右岸 1 孔，孔口宽 5 m，高 6 m。底坎高程均为 471 m。7 台机组总引水量为 1862 m³/s。

运行效益 龚嘴水电站自发电以来，到 1990 年底累计发电 523.3 亿 kW·h，担负四川电力系统的调峰、调频任务，对电力系统的安全稳定运行发挥了重要作用。

设计和施工单位 成都勘测设计院设计，水利电力部第七工程局施工。

(李维藩)

gongba

拱坝 (arch dam) 向上游弯曲，通过拱的作用将承受的载荷主要传到峡谷两岸拱座上去的坝。拱座是拱坝的两岸坝基，亦称拱肩。拱坝是一种经济可靠的坝型。在合适的地形、地质条件下，拱坝坝体方量较小，只有重力坝的 30%~80%，且超载能力较高。拱坝坝顶可以布置自由跌流式溢洪孔口或挑流式溢洪孔口以及滑雪道式溢洪道，也可以在坝内布置泄水深孔或中孔，但总泄量和单宽流量一般较重力坝小。泄洪布置需注意下泄水流的向心集中问题，并妥善解决好下游的消能防冲问题，尤其需防止下游冲刷影响拱座的稳定。拱坝设计比较复杂，对施工质量和坝址的地形、地质条件要求较高。随着工程经验的积累，现在不仅在地形、地质条件良好的坝址修建拱坝，而且在较宽的坝址和地质条件较差的坝址也修建了不少拱坝。

发展简史 人们很早就知道利用拱的作用修建水坝。公元 3 世纪在法国修建的坝高 12 m 的鲍姆(Borm)砌石圆筒拱坝，是世界上最早的一座拱坝。此后，土耳其、伊朗、西班牙和意大利等国相继修建了一些砌石拱坝。1884 年美国修建了世界上第一座混凝土拱坝，熊谷(Bear Valley)拱坝，高 20 m。20 世纪 20~40 年代拱坝设计理论得到发展。美国内政部垦务局(United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, USBR)提出了较完整的试载法(也称拱

梁分载法),使拱坝的设计达到了较高的水平。50年代中叶以后在法国、意大利、葡萄牙、西班牙、瑞士、日本、苏联等国家修建了大量拱坝,特别是双曲薄拱坝发展很快。据1980年统计,世界建有15 m以上的拱坝约2500多座,其中坝高100 m以上的120余座。世界最高的拱坝是1984年建成的苏联英古里(Ингурь)拱坝,坝高272 m。中国第一座拱坝是1927年在福建厦门建成的上里砌石拱坝。50年代末建成了坝高78 m的流溪河双曲拱坝。70年代以后,中国的拱坝建设发展很快。至1985年末已建坝高15 m以上的拱坝800多座,其中砌石拱坝700多座。最高拱坝有台湾省的德基双曲拱坝(坝高181 m)和青海省的龙羊峡重力拱坝(坝高178 m)。四川省的坝高240 m的二滩双曲拱坝已于1987年开始进行施工准备。1971年建成的河南省群英砌石重力拱坝,坝高101.5 m,是世界上最高的砌石拱坝。

类型 拱坝的类型可按筑坝材料、立面的体形、拱圈几何形状、坝体结构和厚高比划分如下。

(1) 按筑坝材料分为混凝土拱坝和砌石拱坝(见砌石坝)。

(2) 按立面的体形分:仅在水平面上弯曲的拱坝称为单曲拱坝;在水平面上和高程上都弯曲的拱坝称为双曲拱坝(见图1)。

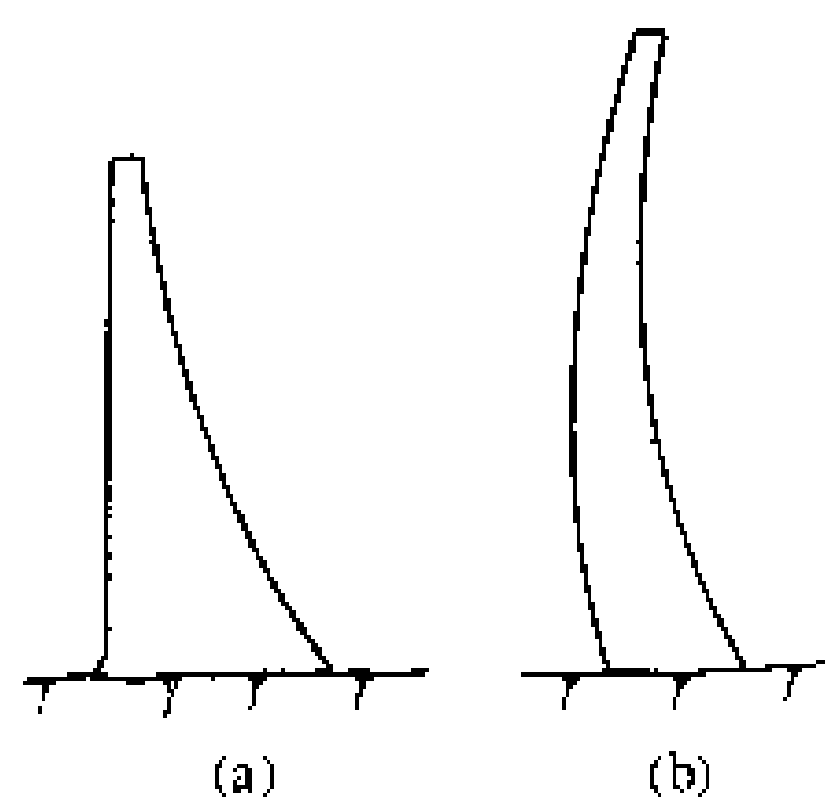


图1 拱坝剖面示意图

(a) 单曲拱坝; (b) 双曲拱坝

(3) 按水平拱圈轴线的几何形状可分为圆拱拱坝、抛物线

拱拱坝、双曲线拱拱坝、椭圆拱拱坝和对数螺旋拱拱坝。圆拱拱坝又可分为单圆心拱坝和多圆心拱坝。多圆心拱坝的水平拱圈的轴线是由多个圆心的圆弧组成的。工程中以采用三圆心拱坝的居多。按各个水平拱的厚度是否变化分为等厚拱拱坝和变厚拱拱坝。一般变厚拱是从拱冠向拱座加厚。

(4) 按坝体结构可分为坝体周边嵌固在基岩上的拱坝和有周边缝的拱坝(图2)。多数拱坝属前一种。有周边缝的拱坝沿坝底基础面设置垫座,在坝体与垫座之间设置周边缝,使其起铰的作用,以改善坝体及其基础的应力状况。

(5) 按拱坝的厚高比,中国SD145-85《混凝土拱坝设计规范》规定:坝底最大厚度与坝高之比小于0.2的为薄拱坝;0.2~0.35的为中厚拱坝;大于0.35的为厚拱坝,也称重力拱坝。重力拱坝内设置纵向空腔的称为空腹拱坝(见空腹坝),厚高比与重力坝接近的

拱形坝则称为拱形重力坝,属于整体重力坝的范畴。

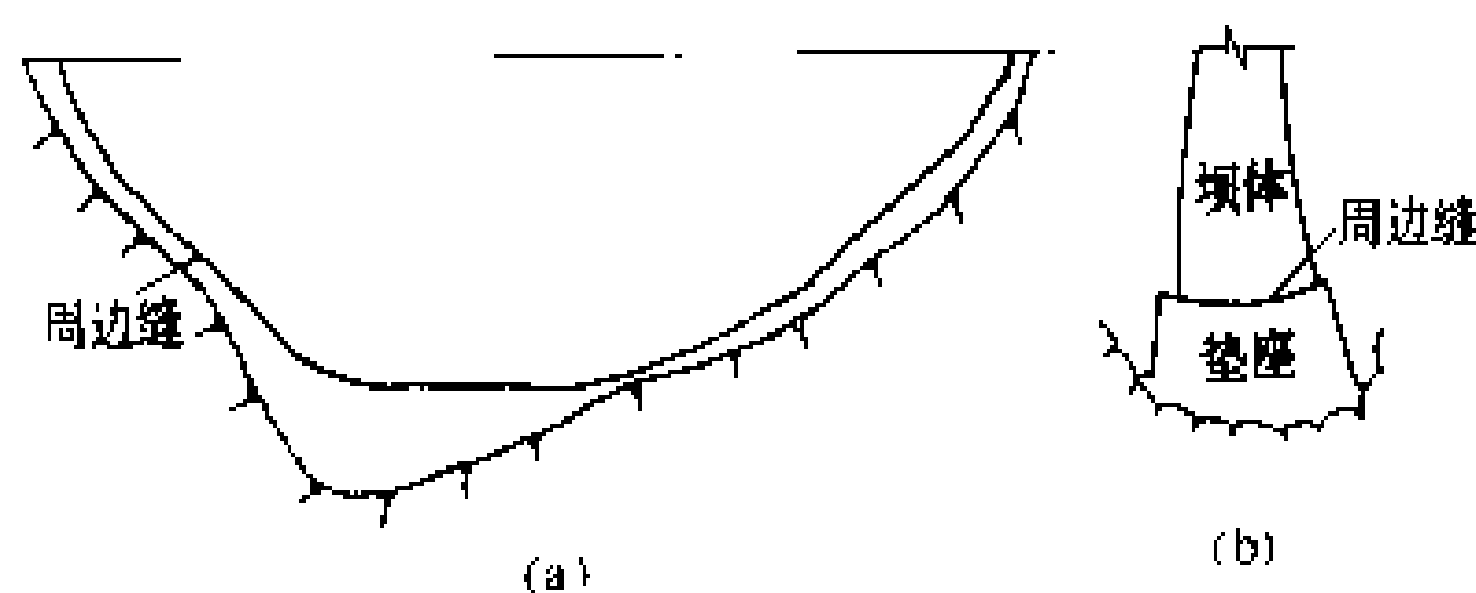


图2 有周边缝的拱坝示意图

(a) 立视图; (b) 剖面图

载荷 作用在拱坝上的载荷有静水压力、动水压力、温度载荷、自重、扬压力、泥沙压力、浪压力、张压力和地震载荷等。由于拱坝为三维高次超静定结构,温度载荷对拱坝具有更为重要意义。确定温度载荷需先计算拱坝横缝灌浆时(即封拱时)的坝体温度场,根据坝体相对封拱时年平均温度场的变化,分别得出坝体最大温升和温降的数值。计算温升、温降两种情况下坝体的应力和变形,以及对拱座稳定的影响。

拱座稳定 自1959年坝高66.5 m的法国马尔帕赛(Malpasset)双曲拱坝因拱座滑动失稳溃决后,各国都对拱坝拱座稳定问题十分重视,包括选择有利的坝址、加强地质勘探和岩石力学试验研究以及计算分析等,必要时采取混凝土井、铜置换、灌浆、排水和预应力锚索加固等工程措施对拱座进行加固处理。(见拱座稳定和岩基处理)

应力分析 拱坝主要承受压应力。受载荷后坝体内的应力分布及拉、压应力的量值是影响工程安全的重要因素。拱坝应力分析一般采用拱梁分载法计算。比较复杂的拱坝,如坝内设有孔洞、基础条件复杂等,需采用有限元法计算或用结构模型试验加以验证。

(郑顺炜)

gongzuo wending

拱座稳定 (stability of arch dam abutment)

拱坝两岸的坝基稳定。它具有岩质坝基抗滑稳定的一般性质(见坝基稳定)。拱坝为超静定空间结构,受力主要传给两岸拱座岩体承受。拱座受力一般较其他坝基为大,为空间力系,受力条件复杂,受拱座变形影响很大,不易准确确定。拱座内一般多含有断裂构造,与临空面组合,容易形成稳定性差的岩体。拱座失稳主要为滑动失稳和变形失稳。渗流稳定可由防渗、排水措施保证。拱座失稳是拱坝失事的主要原因。法国马尔帕赛(Malpasset)双曲拱坝,坝高66.5 m。1959年在蓄水5年之后,由于左岸拱座滑动失稳溃坝,造成严重的生命、财产损失,引起世界对拱座抗滑稳定的普遍重视。拱座变形失稳可能引起坝体应力的严重恶化,但尚



无由于拱座变形失稳造成拱坝严重失事的事例。一般当拱座岩体的变形模量为坝体混凝土的 1/4 以上时,不致造成坝体应力恶化。

影响拱座稳定的因素 主要有地形、地质、拱坝体形、工程布置等。两岸地形雄厚、向下游收缩、无沟

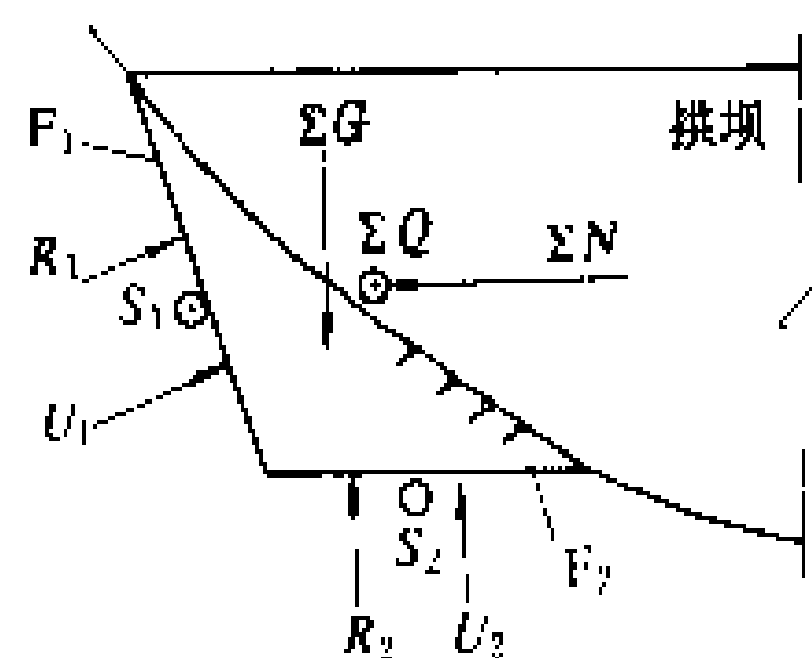


图 1 拱座整体抗滑稳定分析示意图

F_1 —侧滑面; F_2 —底滑面; ΣG 、 ΣN 、 ΣQ —拱坝作用在拱座的空间力系; R_1 、 S_1 、 R_2 、 S_2 —侧滑面和底滑面上的反力; U_1 、 U_2 —渗压力

谷切割、岩体坚硬完整对拱座稳定有利。断裂构造多、规模大、产状不利、存在软弱夹层、形成临空滑动边界等是拱座稳定的不利条件。优化坝体体形,使拱座推力指向山里,可以改善拱座的稳定条件。规划工程布置和施工时要注意避免拱座及其下游岩体遭受破坏,防止高速水流冲刷。

拱座稳定的评价 首先需要搞清拱座的地质构造,分析拱座岩体可能滑动(或变形)失稳的边界条件。确定滑动边界上的抗剪强度指标(或变形体的变形模量)和拱座所受空间力系。用计算分析或模型试验方法推求拱座滑动安全系数及拱座变形对坝体应力的影响。综合考虑以上各种因素和条件,对拱座稳定做出评价。拱座稳定计算分析方法有刚体极限平衡法和有限单元法两类。各国拱坝设计规范多以刚体极限平衡法做为判断拱座抗滑稳定的主要方法。这种方法计算比较简单,便于对抗剪参

数、边界条件等因素进行敏感性分析。有限单元法可以得出拱座各点的应力和变形,用以分析各点的局部稳定条件和拱座变形对拱坝的影响。模型试验方法中以地质力学模型试验最为完善,可以较好地模拟拱座的地质条件,但试验工作量大,模拟技术复杂,适用于大型工程地质条件复杂的拱座稳定研究。拱座抗滑稳定分析原则上应按空间问题处理,确定其整体抗滑稳定安全系数。在情况简单,无特定的空间滑裂面时,可按平面拱圈作初步核算。两种分析方法的示意图分别见图 1 和图 2。

(董育坚)

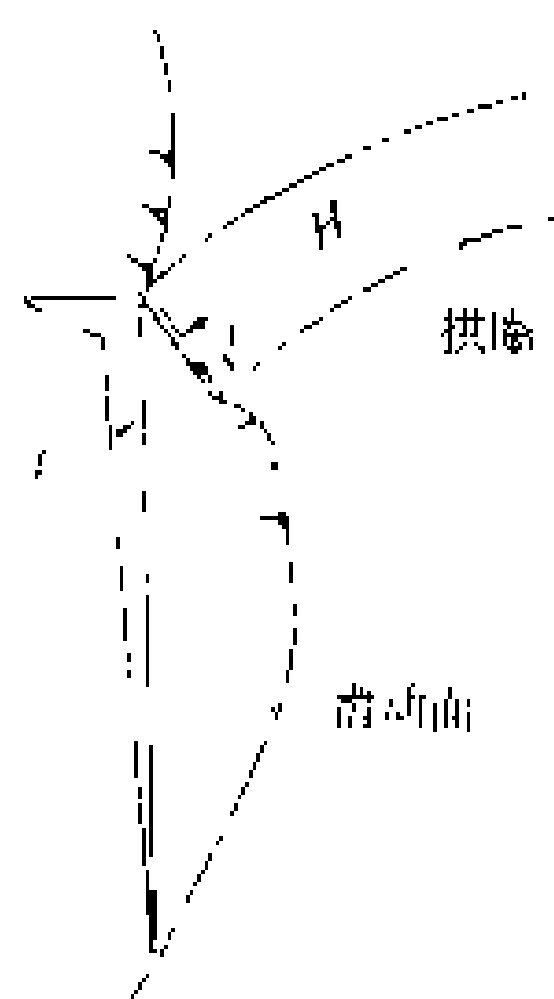


图 2 平面拱圈抗滑稳定分析示意图
 H 、 V —拱圈传给拱座的力; U —作用在滑动面上的渗压力

gu hedao

古河道 (buried river course; ancestral river course) 河流变迁遗留的废弃河道。查明有古老冲积层是确定古河道存在的主要依据。

由于后期自然和人为的破坏,平原区古河道形态需要根据呈带状分布的断续沙堤、鬃岗、水洼地、牛轭湖等微地貌以及沉积物特点,通过勘探确定。大河中下游或不同水系形成的冲积平原,河道演变复杂,弃道较多。中国黄河下游为汉道式游荡型河床,改道溃决频繁,弃道纵横密布,冲积层岩性变化大且重叠交错。江汉平原长江曲流发育,牛轭湖、弃道也多。山区古河道多在现代河谷谷坡或分水岭地带保留断续的河谷形态和沉积物的遗迹。

古河道中的砂砾石冲积层是砂矿和地下水可能的储存带,也是建筑材料混凝土骨料的产地。水工建筑物布置中常利用古河道地形布置泄水建筑物;由于古河道的砂砾石、沙、粘土多呈互层或透镜体分布,工程建设中易产生不均匀沉陷或渗透变形,也是贮水建筑物发生集中渗漏的地带。因此,在水利水电工程中查明古河道分布范围、高程和古老冲积层的组成、分布情况十分重要。

(郝绮霞)

Guli Shuidianzhan

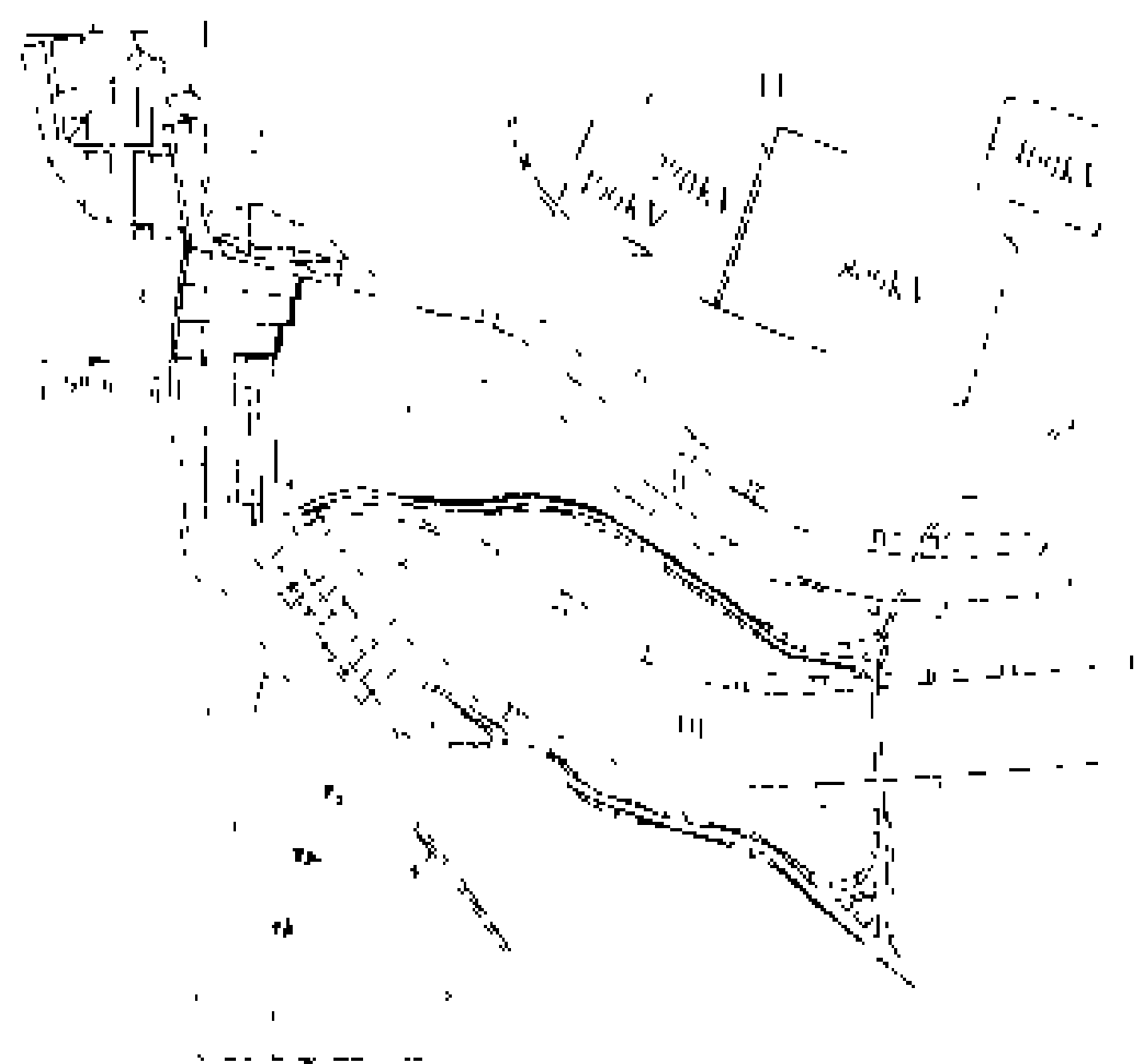
古里水电站 (Guri Hydropower Station)

又名拉乌·利欧尼水电站(Raul Leoni hydropower station),位于委内瑞拉东部的卡罗尼(Caroni)河上,在首都加拉加斯东南约 600 km。卡罗尼河是南美洲第二大河奥里诺科河的支流,古里水电站坝址位于卡罗尼河河口以上 95 km 处。工程分两期开发。初期装机容量 2660 MW。二期续建达到 9100 MW,年发电量 510 亿 kW·h。所发电力除供应附近的圭亚那工业区外,送往首都加拉加斯,联入国家电力系统。采用 400 kV 超高压和 800 kV 特高压输电。大坝为混凝土重力坝,初期最大坝高 110 m,1984 年加高到 162 m。还留有地位供进一步扩建。(参见彩图插页第 14 页 23 图)

初期工程于 1963 年开工,1968 年投产 3 台机组,装机容量 540 MW。1969 年至 1977 年间续装 7 台机组,1 号厂房总装机容量达 2660 MW。1976 年开始二期工程,1984 年二期机组开始发电,1986 年 2 号厂房的 10 台大机组投产总容量 6100 MW。初期工程的机组,因水头提高,总容量提高到 3000 MW。1 号和 2 号厂房共计装机 9100 MW(2 号厂房 10 台大机组额定水头下单机额定出力 610 MW,最大水头下单机最大出力 730 MW,因此,有的文献把古里水电站的最终装机容量定为 10300 MW)。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 8.5 万 km^2 。流域内平均年降水量 2000 mm，多年平均年径流量 1537 亿 m^3 。流域内森林覆被率达 74%，泥沙很少。实测最大流量 17000 m^3/s ，计算可能最大洪峰流量 48100 m^3/s ，23 天洪量 455 亿 m^3 。初期正常蓄水位 215 m，相应库容 170 亿 m^3 ，死水位 195 m，调节库容 111 亿 m^3 。最大水头 92 m。二期正常蓄水位抬高至 270 m，总库容增至 1350 亿 m^3 ，死水位 240 m，调节库容增至 854 亿 m^3 ，库容系数 β_1 由 0.07 提高到 0.56。电站设计水头 130 m，最大水头 146 m。

枢纽布置 见图。坝址基岩为坚硬的花岗片麻岩。主坝初期顶长 846 m。其中溢流坝段长 184 m，设 9 个溢流孔，每孔宽 15.24 m，高 20.76 m，孔口设弧形闸门控制，最高洪水位 219.5 m 时泄洪能力为 40000 m^3/s 。溢洪道分 3 道泻槽，槽间用混凝土墙隔开，加高大坝时，1 道泻槽施工，其余 2 道泻槽可供泄洪。右岸土石坝长 220 m。二期施工时作上游围堰用。离右坝肩 1400 m 处，利用垭口建自溃式非常溢洪道，可泄洪 10000 m^3/s 。主溢洪道右侧为 1 号厂房的进水口坝段，在大坝与厂房之间留出地位，以便二期加高大坝时向下游方向加厚坝体。



古田溪水电站枢纽布置图

- 1—左岸土石坝；2—左岸重力坝；3—溢洪道；4—右岸重力坝；5—重力坝加长段；6—右岸土石坝；7—1 号厂房；8—2 号厂房；9—1 号尾水渠；10—2 号尾水渠；11—开关站

二期工程包括：加高混凝土重力坝 52 m，最大坝高达 162 m，大坝顶长相应增长至 1426 m；增建右岸土石坝长 4000 m，最大坝高 97 m；增建左岸土石坝长 2000 m，最大坝高 102 m；增建水库边缘垭口副坝多座，共长 32000 m，最大坝高 45 m；分期加高溢洪道 3 道泻槽，升高堰顶 55 m；增建 2 号厂房；增建 10 个

进水口，各设 2 扇尺寸为 6.4 m×14.6 m 的平面闸门；安装 10 根直径为 10.5 m 的压力钢管及 10 台单机容量为 610 MW 的大机组；开挖修建 2 号尾水渠。

机电设备 安装有 5 种单机容量的混流式水轮发电机组，2 号厂房的 10 台大水轮机转轮直径 7.2 m，转速 112.5 r/min，额定水头 130 m 时，流量 512 m^3/s ，额定出力 610 MW；水头 146 m 时最大出力 730 MW。发电机额定功率 700 MV·A，最大功率 805 MV·A。每台发电机接 3 台 268.5 MV·A 单相变压器组成的发电机-变压器单元组，升压至 400 kV 和 800 kV。

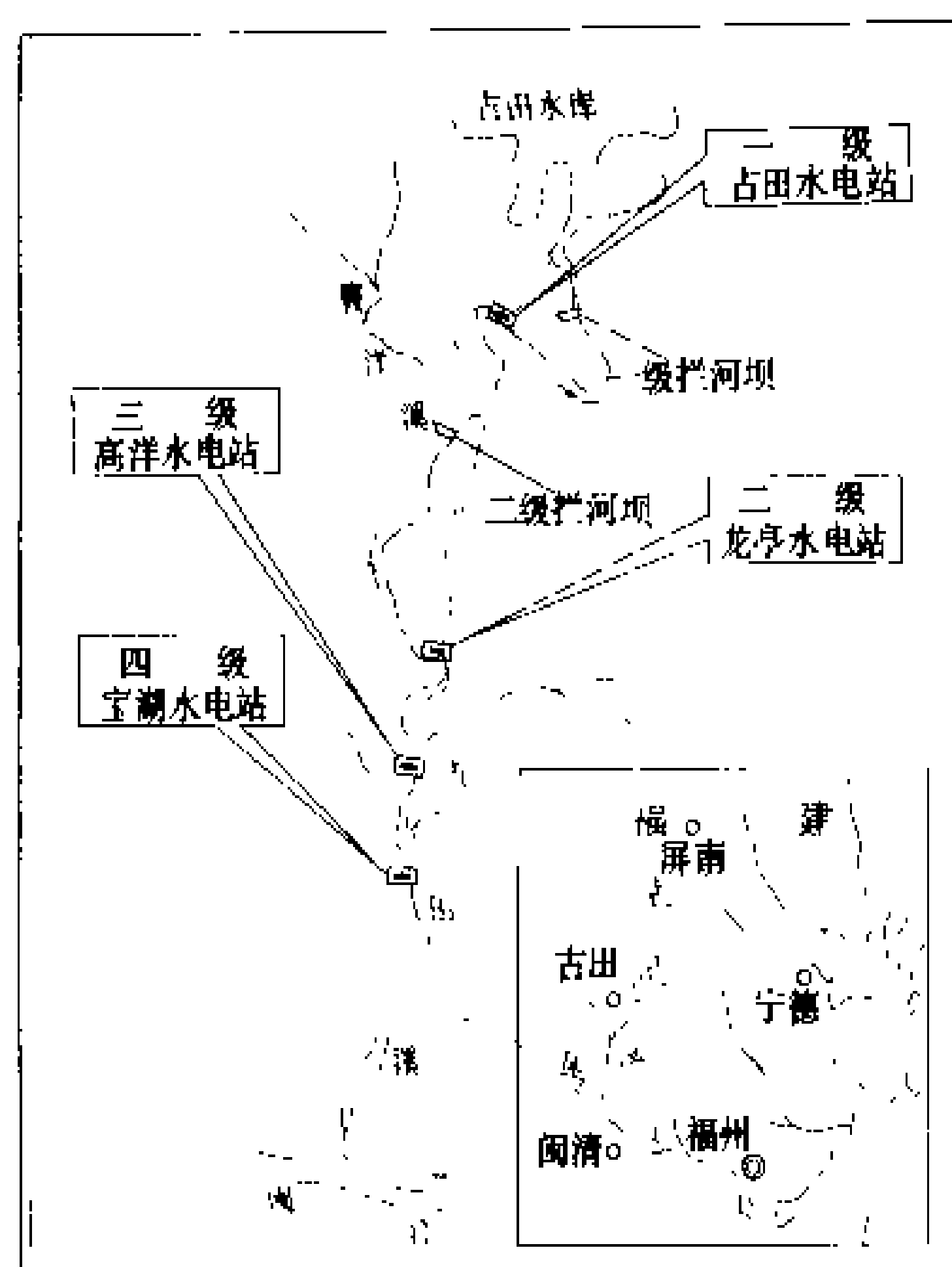
主要工程量 一期工程：土石方开挖 767 万 m^3 ，土石方填筑 347 万 m^3 ，混凝土浇筑 174 万 m^3 。二期工程：土石方开挖 1433 万 m^3 ，土石方浇筑 8543 万 m^3 ，混凝土浇筑 671 万 m^3 。

(陆钦侃)

Gutianxi Tiji Shuidianzhan

古田溪梯级水电站 (Gutianxi Cascade Hydropower Stations) 位于中国福建省，由古田、龙亭、高洋、宝湖等 4 座水电站组成。

古田溪系闽江支流，全长 90 km，流域面积 1799 km^2 ，河道天然落差约 360 m。古田县城以上河道较开阔，县城以下山坡陡峻，水流湍急，水能资源集中。全梯级 4 座水电站共利用水头 316.2 m，为天然落差的 87.8%，电站位置见图所示。全梯级装机 12 台，总计装机容量 259 MW，设计多年平均年发电量 10.27 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。总投资 2.0352 亿元，平均每千瓦投资 785.5



古田溪水电站位置示意图



元。1951年3月一级古田水电站开工,1956年3月1日2台机组发电。1973年12月19日,三级高洋水电站最后一台机组发电。

古田溪梯级水电站建成时是福建省电力系统的主力电厂之一,担负电力系统调频、调峰和事故备用任务。至1990年底,全梯级累计发电202.148亿kW·h,按电力系统发电企业1990年不变价格计算,累计产值15.9696亿元。全梯级平均发电成本0.0103元/(kW·h)。除发电外,还有造林、养殖和通航效益。

古田溪梯级水电站由上海(水电)勘测设计院设计,闽江水电工程局施工。

一级古田水电站 位于旧古田县城下游龟瀾峡谷入口处,控制流域面积1295 km²,水库总库容6.42亿m³,为多年调节水库。设计水头109 m,最大水头125.8 m,最小水头95 m。建宽缝重力坝,最大坝高71 m。坝顶泄洪,设有4孔溢流孔,由宽13 m,高8 m的弧形闸门控制,最大泄流量3190 m³/s。引水隧洞长1920 m,直径4.4 m,末端设直径11.9 m,高65 m的差动式调压井,井后用6条钢管引水至地下厂房。厂房长59.6 m,宽12.5 m,高29.5 m,内装2台单机容量为6 MW和4台单机容量为12 MW的混流式水轮发电机组。1951年3月开工,1956年第一台机组发电,1960年8月竣工。

二级龙亭水电站 位于龙亭瀑布附近,为引水式水电站。水库为日调节,正常蓄水位与古田水电站尾水衔接。设计水头104.6 m,最大水头125 m,最小水头103 m。拦河坝为钢筋混凝土平板坝,坝顶溢流堰长81.3 m,最大泄流量3300 m³/s。压力引水隧洞长5241 m,直径6.4 m,后设直径20 m,高59 m的差动式调压井,井后压力管道经岔管分两支引水入地面厂房。厂房内装2台单机容量为65 MW的混流式水轮发电机组。1958年7月开工,1969年3月第一台机组发电,1973年8月竣工。

三级高洋水电站 位于闽清县境,为坝式水电站。拦河坝为钢筋混凝土平板坝,坝顶溢流堰长81.3 m,最大泄流量4320 m³/s。水库为日调节,正常蓄水位与龙亭水电站的尾水衔接。设计水头28.5 m,最大水头32.3 m,最小水头22.1 m。厂房位于坝后,内装单机容量16 MW和17 MW的轴流式水轮发电机组各一台。1958年9月开工,1965年3月第一台机组发电,1973年12月竣工。

四级宝湖水电站 位于闽清县境,为坝式水电站。拦河坝为宽缝重力坝,坝顶溢流。设有3孔溢流孔,由宽15 m,高9.5 m的弧形闸门控制,最大泄流量4420 m³/s。水库为日调节,正常蓄水位与高洋水电站尾水衔接。设计水头28.5 m,最大水头33.1 m,最小水头

19.9 m。厂房位于坝后,内装2台单机容量为17 MW的轴流式水轮发电机组。1958年12月开工,1971年5月第一台发电,1972年12月竣工。

(杨德晔)

gujie guanjiang

固结灌浆 (consolidation grouting) 为改善岩石力学性能的灌浆。固结灌浆的主要作用是:①提高岩石的变形模量和承载强度;②加强岩石的密实性和均匀性;③减少岩石变形和不均匀沉降。

在岩石基础上建坝,常需进行固结灌浆。灌浆范围根据地质条件、岩石完整情况、坝型、以及基础岩石受力条件等而定。建造重力坝,当岩石比较完整、坚硬,且坝不高时,可仅在坝基内的上游和下游应力大的地区内布孔;如果岩石比较破碎,且坝又比较高时,则多在坝基内全面布孔。高的混凝土重力坝有时还需在坝基外的上、下游一定范围内增加布孔。建造混凝土拱坝,常需对两岸拱座岩石加强固结灌浆。坝基固结灌浆孔常布置呈梅花形、六角形和方格形。固结灌浆孔一般均较浅,可采用风钻或潜孔钻钻孔。

当岩石裂隙较多且较破碎时,坝基固结灌浆施工,多在岩石表面上浇筑混凝土压重后进行,其优点是会发生表面漏浆,可适当地提高灌浆压力,易于保证灌浆质量。缺点是易和浇筑混凝土发生干扰。当岩石坚硬完整裂隙少时,也常安排在浇筑混凝土前进行,其优点是施工方便,对浇筑混凝土的干扰少。缺点是易发生表面漏浆,影响灌浆质量。

灌浆施工必须遵守逐渐加密的原则,一泵一孔单独灌浆,只有在特殊情况下,才允许一泵多孔同时灌浆,但应采用并联方式,且使用一台泵同时进行灌浆的孔数不宜多于4个。

灌浆使用水泥浆,一般从水灰比为8(或为5)开始,逐级变浓,当吸浆量大时,也可酌情越级变浓。灌浆结束标准为:在规定的压力下,当吸浆量小于0.4 L/min,持续30 min,即可结束。

固结灌浆效果检查应以岩石力学性能改进的程度为主要标志。在灌浆前后,测试岩石的动弹性模量或静弹性模量,加以判断。这种测试的方法简便,代表的面积大,一般多被采用。此外,也有采用钻检查孔,进行压水试验和灌浆的方法,以单位吸水量和单位水泥注入量来检验固结灌浆效果的,这种方法更为简便,采用者更多一些。

在岩石中建造水工隧洞,在衬砌后面的岩石的一定深度内,也常进行固结灌浆。灌浆孔顺洞轴线呈环形排状布置,每环排上均匀布置若干孔,与其相邻环排的灌浆孔相互交错呈梅花形。



水工隧洞岩石固结灌浆应在回填灌浆后进行，施工工艺和质量检查方法可参考坝基固结灌浆。
(孙 判)

guti lixue

固体力学 (solid mechanics) 力学的一个分支学科，研究可变形物体在载荷、温度、湿度等外界因素作用下，其内部各个质点所发生的位移、运动、应力、应变、破坏等现象的规律性。它是一个理论性强、应用而广的力学分支。其内容十分广泛，既有弹性问题，又有塑性问题；既有静力问题，又有动力问题；既有线性问题，又有非线性问题，后者又有几何非线性和物理非线性两类。其解题方法有解析法和数值分析法两类。

发展概况 古代人类的生产活动中，早已应用了不少固体力学的基础概念。公元前 2000 年前就已建造出符合现代力学概念的宫殿、桥梁等建筑物和简单的车、船以及各种机械。但是直到 1678 年英国的 R. 胡克 (R. Hooke) 提出物体的变形与所受外力成正比的定律，固体力学才奠定了发展的基础。又经过瑞士的 L. 欧拉 (L. Euler)，法国的 C. - A. de 库仑 (C. - A. de Coulomb)，A. - L. 柯西 (A. - L. Cauchy) 以及意大利的 A. 卡斯蒂利亚诺 (A. Castigliano) 等许多科学家的努力，固体力学逐步具备了完整的理论体系和有效的解题方法。早期的固体力学理论是以均匀连续介质为基础的，20 世纪二三十年代出现断裂力学和复合材料力学以后，研究范围扩大到非均匀连续体以及含有断裂结构的非连续体。电子计算机和有限元法的发展，使固体力学的原理可用于求解很多复杂的问题。

学科分支 根据研究对象和研究方法的不同，固体力学可以分为材料力学、弹性力学、塑性力学、结构力学、断裂力学、振动理论、稳定性理论、复合材料力学等次级分支学科，它们的研究要点各有侧重，应用范围也不尽相同。

(1) 材料力学。研究材料在载荷作用下的力学特性。采用一些合理的假设，使理论和计算大为简化，并能得到精度满足设计要求的结果。它在生产实践中应用最广，并作为其它力学分支的基础。

(2) 弹性力学。研究弹性物体在载荷和其它外界因素作用下产生变形和内力的学科。在弹性力学中，除对介质作弹性、均质和连续等基本假定外，不附加其它假定，因而理论更严密，求解方法也相应复杂一些。

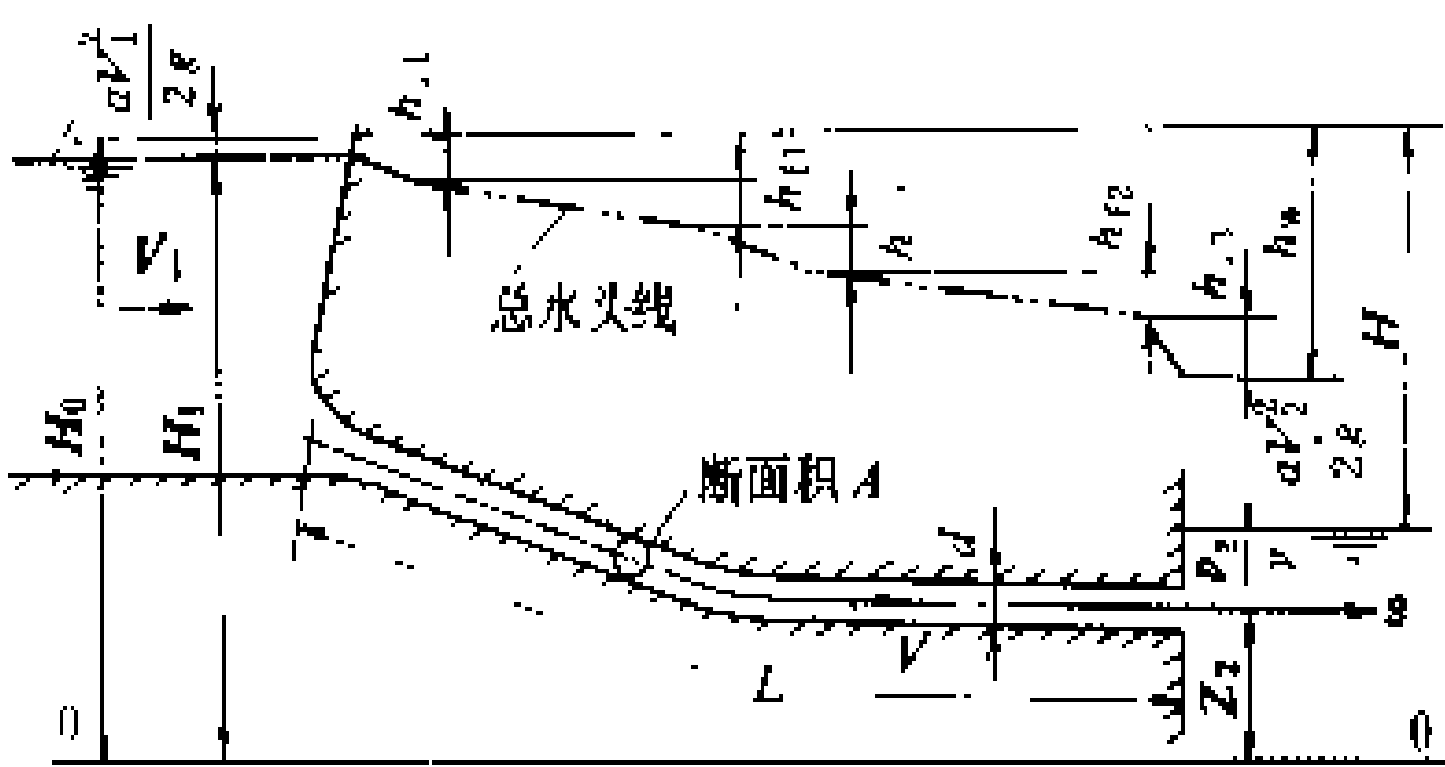
(3) 塑性力学。研究物体超过弹性极限后的永久变形和作用力之间的关系，以及物体内部应力和应变的分布规律。与弹性力学的区别在于它考虑物体内部产生的卸荷后不能恢复的永久变形。物体受力后常有弹

塑性区并存的情况。
(4) 结构力学。研究工程结构承受和传递外力的能力和规律，以及结构优化问题；计算确定满足强度、刚度和稳定性条件而又经济合理的结构物断面尺寸；侧重于对杆件和板壳等构成的复合体系的分析与设计。
(5) 断裂力学。研究结构中裂纹尖端的应力场及应变场，并由此分析裂纹扩展条件和规律。
(6) 振动理论。研究固体在周期性运动或某种随机运动过程中的各种现象及其发生条件。
(7) 稳定性理论。研究细长杆、杆系结构、薄板等在压力作用下的变形和屈曲问题，以及丧失平衡状态和承载能力的条件。
(8) 复合材料力学。研究由两种以上不同性能材料组成的多相固体的受力和变形规律，并按微观力学、细观力学和宏观力学 3 个层次进行研究。
(范元勋)

guandao shuili xue

管道水力学 (pipeline hydraulics) 研究有压管道系统内液体流动问题，是水动力学的分支学科。管道水力学的研究内容包括有压管道内的单相流、多相流和非牛顿流体的流动。水力发电工程的压力隧洞、电站机组引水管道，农田水利中的涵管、倒虹吸管、喷灌管道，城市自来水管网中的水流，原子反应堆的液体循环冷却管路系统内的液体流动为单相流。放淤管道中的含沙水流，工业输送管道和排污管中的液-气-固多相混合流，生物工程中的血管流等，为多相流或非牛顿流体的流动。这类管道内的流动极为复杂，涉及各相的体积浓度、速度、压强、温度诸因素及其场分布规律，相间相对滑动、动量传递、传质、传热以及化学反应、电磁效应等关系，多相流的阻力，流动的稳定性，流动类型及临界状态等问题。

管道内的有压流动，按流体类型分为单相流或多相流；按管中流动特性分为：层流或紊流，恒定流或不恒定流；按管道的布置形式分为简单管道（如沿程直径不变的单一直圆管）或复杂管道（沿程变断面的管路、弯管、叉管、管网等）。



简单管道图例

简单管道内水体的恒定流动是管道水流的基本形式,参照图例可写出连续方程,能量方程及管道水头损失 h_w 的表达式如下

$$Q=VA$$

$$H_0=H_1+\frac{\alpha V_1^2}{2g}=Z_2+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{\alpha V^2}{2g}+h_w$$

$$h_w=\Sigma h_j+h_f$$

式中 Q 为流量; A 为管道断面面积; V 为断面平均流速; p 为压强; Z 为位置高度; 下标 1, 2 分别表示上下游断面的量; H_0 为以水头表示的势能; H_1 为断面 1 的压力水头; γ 为水的容重; g 为重力加速度。局部水头损失为 $\Sigma h_j=\Sigma \zeta \frac{V^2}{2g}$, ζ 为局部损失系数; 沿程水头损失为 $h_f=\lambda \frac{L}{d} \times \frac{V^2}{2g}$, λ 为阻力系数 (见水流阻力), d 为管径, L 为管长。若 $H=H_0-Z_2-\frac{p_2}{\gamma}$ 为上下游水位差, 则简单管道的输水流量

$$Q=\frac{A}{\sqrt{a+\lambda \frac{L}{d}+\Sigma \zeta}} \sqrt{2gH}$$

通常令 $\mu_c=\frac{1}{\sqrt{a+\lambda \frac{L}{d}+\Sigma \zeta}}$ 为管路系统的流量系数。

对于复杂管道,常分解为简单管道的组合,但需计及各种类型的局部水头损失。大的管网系统有时包括分支状管网或环状管网。

当有压管道系统中通过的流量随时间变化时,为管道不恒定流。描述这类管流的基本方程组是一维不恒定渐变总流的连续方程、运动方程或能量方程,当管中液体不可压缩,密度 ρ 为常数时,可参照图例写出

$$\frac{\partial}{\partial S}(AV)+\frac{\partial A}{\partial t}=0$$

$$\frac{\partial Z}{\partial S}+\frac{1}{\gamma} \frac{\partial P}{\partial S}+\frac{1}{g}\left(\frac{\partial V}{\partial t}+V \frac{\partial V}{\partial S}\right)+\frac{4 \tau_0}{\gamma d}=0$$

$$\text{或 } Z_1+\frac{p_1}{\gamma}+\frac{V_1^2}{2g}=Z_2+\frac{p_2}{\gamma}+\frac{V_2^2}{2g}+h_w+\frac{1}{g} \int_1^2 \frac{\partial V}{\partial t} dS$$

式中 τ_0 为流段四周管壁的平均剪切力; $\frac{1}{g} \int_1^2 \frac{\partial V}{\partial t} dS$ 项为不恒定流动的惯性水头。当管道内的流动要素急剧变化时 (水电站急剧增减负荷, 水泵站快速启闭), 常因管内液体的惯性作用而导致管内压强的大幅度波动, 而产生水击现象 (见水击)。

参考书目

清华大学水力学教研组, 水力学, 北京: 高等教育出版社, 1981

(时启燧)

guanliushi shuilunji

贯流式水轮机 (tubular turbine; straflo turbine) 水流自轴向进入转轮又从轴向流出, 在转轮前后无任何旋转的反击式水轮机。其引水室及尾水管与水轮机均为卧轴布置。使用水头范围一般为 3~20 m, 上限可达 25 m。

结构及其特点 根据水轮机与发电机 (见水轮发电机) 连接和传动方式的不同, 贯流式水轮机又分为半贯流式和全贯流式两大类。半贯流式水轮机见图 1, 从结构上又分为灯泡式、轴伸式和竖井式等, 应用最为广泛的是灯泡贯流式。轴伸式和竖井式多用于小型机, 近

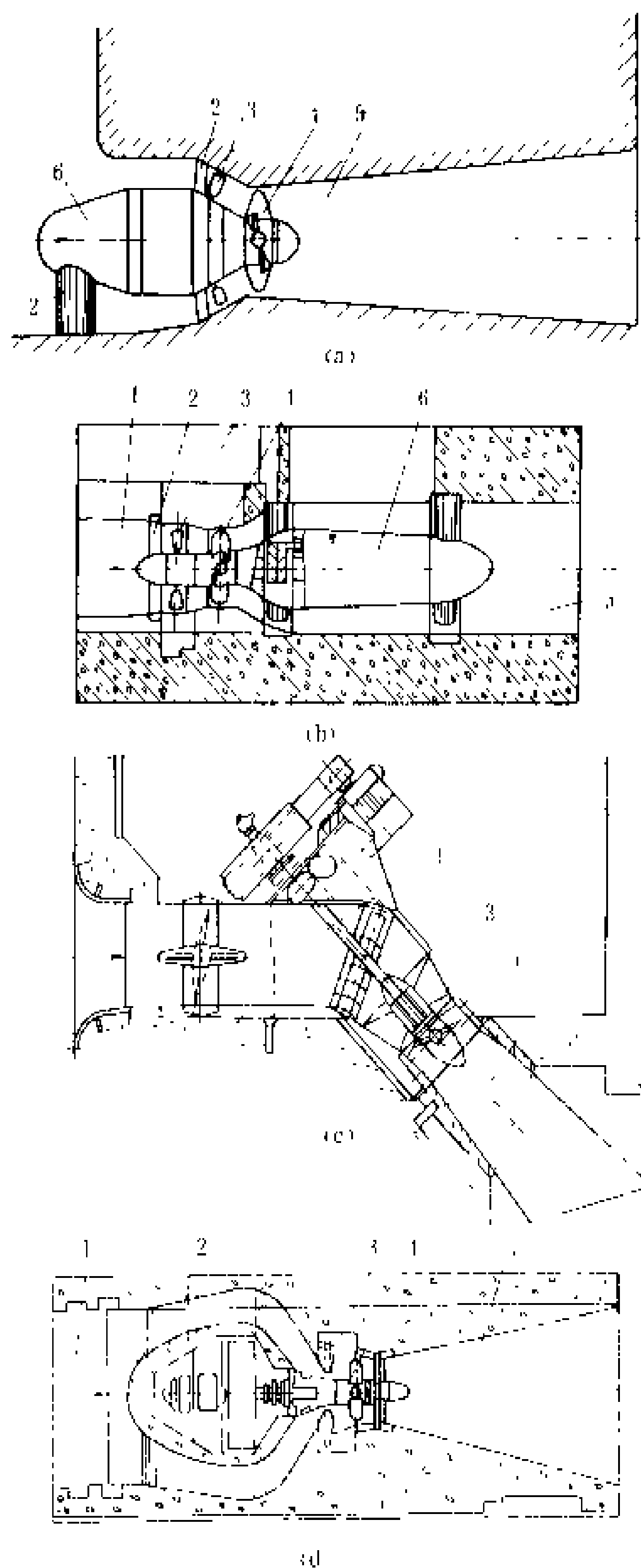


图 1 半贯流式水轮机图

(a) 前置灯泡式; (b) 后置灯泡式; (c) 轴伸式; (d) 竖井式
1—引水室; 2—管形座; 3—导水机构; 4—转轮; 5—尾水管; 6—灯泡

年来竖井式亦用于大中型机组。灯泡式的发电机装在灯泡体内,水流从灯泡体四周流入水轮机转轮,从尾水管流出。当发电机装在转轮前时称为前置灯泡式,见图1(a);发电机装在转轮后时称为后置灯泡式,见图1(b)。轴伸式见图1(c)。竖井式的发电机装在通入厂房的竖井内,见图1(d),主要优点是节省灯泡体的钢材,发电机的通风较好与维护检修较方便,但机组段及厂房的尺寸增大,流道水流条件较差。灯泡贯流式水轮机根据转轮叶片能否转动而分为贯流转桨式和贯流定桨式,灯泡贯流转桨式水轮机应用最广,其主要部件包括引水室、尾水管、管形座(亦称管形柱)、导水机构、转轮等。其工作原理与轴流转桨式水轮机(见轴流式水轮机)相似,但流道简单、水力损失小、平均效率高、过流能力大,在相同水头与出力条件下转轮尺寸较小,厂房及机组段土建工程也相对较为简单,与轴流转桨式比较,经济性较好。全贯流式水轮机见图2,是将发电机转子直接装在水轮机叶片外缘上,随转轮转动,流道平直,结构较紧凑,但发电机密封较复杂。

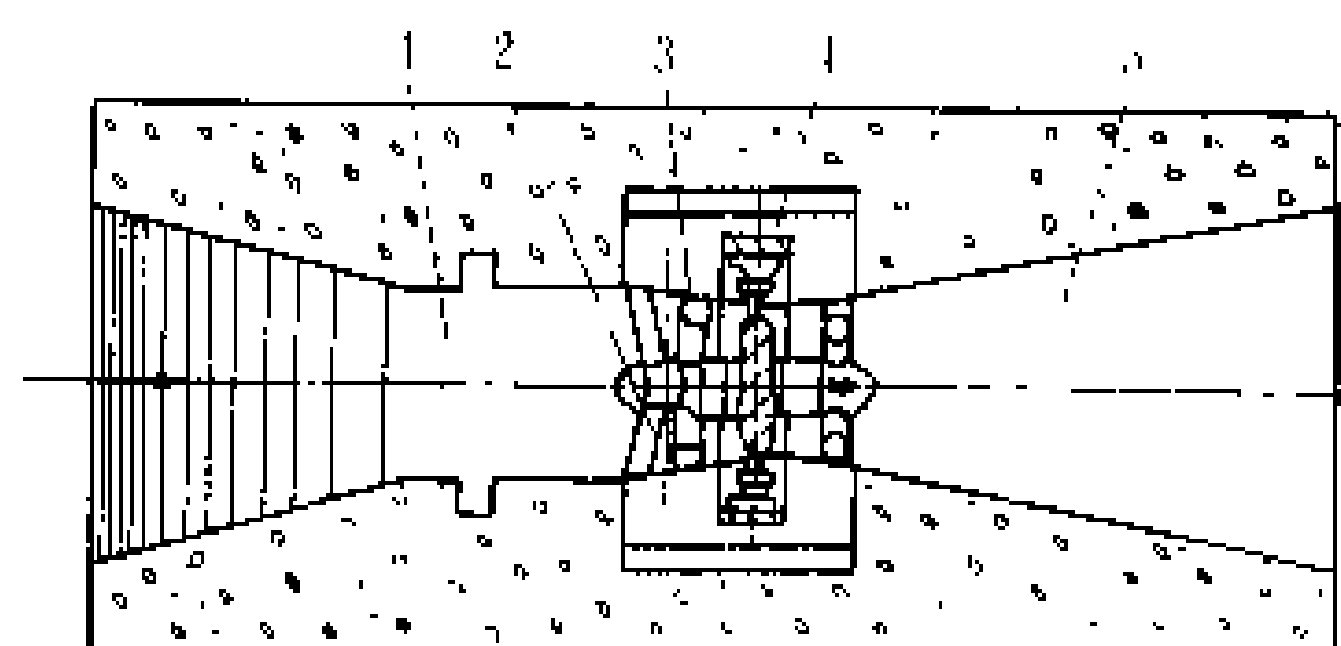


图2 全贯流式水轮机图

1—引水室; 2—管形座; 3—导水机构; 4—转轮;
5—尾水管

使用现状与发展趋势 贯流式水轮机中以灯泡贯流式水轮机发展最快,全贯流式水轮机也在发展中,其发展趋势是高水头、大容量。出力最大的灯泡贯流式水轮机安装在日本的只见(Tadami),单机额定出力为65.8 MW,转轮直径6.7 m,额定水头为20.7 m。转轮直径最大的灯泡贯流式水轮机安装在美国拉辛(Racine)水电站,转轮直径7.7 m,水轮机额定出力24.6 MW,水头7 m。最大的全贯流式水轮机安装在加拿大的安娜波利斯潮汐试验电站,叶片为定桨式,转轮直径7.6 m,额定水头5.5 m,水轮机额定出力为17.8 MW。中国已投入运行的大型灯泡贯流式机组有马迹塘水电站灯泡贯流式机组,水轮机额定出力为18.05 MW,转轮直径6.3 m,额定水头6.55 m,转速75 r/min;广东白坭水电站的灯泡贯流式机组,水轮机额定出力10.47 MW,转轮直径5.5 m,额定水头6.2 m,最大水头10 m。四川安居水电站安装有2台灯泡贯流式水轮机,单机额定出力15 MW,转轮直径5.5

m,最大水头9.6 m。

(史毓珍)

guanjiang

灌浆 (grouting) 将具有胶凝性的固体颗粒浆液或化学溶液,用机械压力或浆液自重压力,压送到岩石裂隙、砂砾石空隙、混凝土坝段间的接缝、岩石与混凝土接触带、或其它需要灌浆的部位中的工程措施。可以达到防渗、固结岩体或其他一些预期目的。

灌浆的分类按灌浆作用分为:帷幕灌浆、固结灌浆、接触灌浆、回填灌浆、接缝灌浆、混凝土缺陷或裂缝补强灌浆等;按灌浆材料,分为:水泥灌浆、水泥粘土灌浆、水泥砂浆灌浆、粘土灌浆、化学灌浆等;按灌浆对象,分为:岩石灌浆、砂砾石(或砂层)灌浆、混凝土灌浆、土体灌浆等;按灌浆压力,分为常压灌浆和高压灌浆;按灌浆机理,分为:渗入性灌浆和张裂式灌浆。

灌浆工程的特点 由于它是隐蔽性工程,必须严格地依照施工技术要求进行施工,同时,还应详细如实地做好施工记录,并及时地对记录资料进行整理和分析,绘制成图表,供指导施工和在竣工后进行质量检查与验收之用。

各类灌浆在设计之前,均应将灌浆有关的各方面的情况摸清,将有关资料搜集齐全。

在设计中对灌浆质量检查的方法和应达到的质量标准需做明确规定。

帷幕灌浆和固结灌浆 由于设计中的未知因素较多,为了供设计尽可能地符合实际情况,在设计之前,往往需在工地进行灌浆试验,以试验所得的成果作为制定设计和编制施工技术要求的主要参考资料。

灌浆方法 帷幕灌浆和固结灌浆施工应遵循逐渐加密的原则,每一灌浆孔应单独进行灌浆。

单孔灌浆的方法分为两类:①全孔一次灌浆,适用于深度小于6 m的浅孔。②全孔分段灌浆,适用于深孔。

全孔分段灌浆,根据灌浆孔内各段的钻进和灌浆的相互顺序,又分为:①自上而下逐段灌浆法,适用于裂隙发育且较为破碎的岩石。②自下而上逐段灌浆法,适用于完整且裂隙少的岩石。③综合分段灌浆法,适用于岩石地质条件比较复杂且灌浆孔较深的情况。④孔口封闭、无栓塞、自上而下分段灌浆法(简称孔口封闭灌浆法),适用于大压力深孔灌浆施工。

每一段灌浆的方式有填压式灌浆和循环式灌浆两种。

灌浆压力 是保证和控制灌浆质量以及提高灌浆经济效益的重要因素。确定灌浆压力的原则是:在不破

guanzhuang

坏地基岩石构造和岩石上已浇筑的混凝土永久性建筑物的基础上,尽可能地提高灌浆压力。一般的作法是先利用公式计算出灌浆压力值,并参考同类地质条件和同类工程使用的压力值,初步选定,再通过灌浆试验予以验证并调整,而后,在进行设计时最终确定。

常用的灌浆压力计算公式如下

无压重时 $P_1 = P_0 + kD$

有压重时 $P = P_1 + \frac{1}{10}K\gamma h$

式中 P_1 为无压重时采用的灌浆压力, 10^5 Pa; P 为有压重时采用的灌浆压力, 10^5 Pa; P_0 为岩石表面允许的压力, 10^5 Pa; k 为灌浆段顶板在岩石中每加深 1m, 所允许增加的压力值, 10^5 Pa/m; K 为系数, 可选用 1~3; γ 为压重层的容重, t/m³; h 为压重层的厚度, m。 P_0 和 k 的值, 可由有关资料中查得。

施工程序 一般为: 钻孔—洗孔—冲洗—简易压水试验—灌浆。

进行简易压水试验的主要作用是: ①了解岩石的渗透性, 以便采取相应的施工工艺和有效的技术措施。②随着灌浆次序的进展, 了解灌浆效果的情况。

灌浆浆液 在岩石中进行帷幕灌浆和固结灌浆常采用纯水泥浆或水泥基质浆液。水泥的细度是影响灌浆质量的关键性因素, 颗粒愈细, 愈易灌入微细裂隙。通常使用 525 或 425 标号的水泥, 要求其通过 4900 孔/cm² 标准筛的筛余量小于 2%~5%。水泥浆应均匀、稳定、并具有良好的流动性, 水泥结石应具有一定的强度。当吸浆量很大时, 常采用水泥砂浆, 砂子应质地坚硬, 级配均匀, 粒径小于 1 mm, 细度模数小于 2, 水泥砂浆中的水灰比(重量比)宜小于 1。

(孙 钊)

guanzhuang jixie

灌浆机械 (grouting machine) 用来搅拌与压送浆液的机械设备。包括灌浆机和浆液搅拌机。

灌浆机 即灌浆泵。在水泥灌浆中用得最多的是往复式泵, 此种泵又分为活塞(或柱塞)泵和隔膜泵二种。在化学灌浆中多采用计量柱塞泵。

(1) 往复式柱塞泵。也称泥浆泵, 分卧式与立式, 缸体多数为双缸或三缸, 常用的水泥灌浆柱塞泵有多种型号, 输送压力为 1.5~6.0 MPa, 大者达 12 MPa, 输浆量为 50~300 L/min, 大者达 540 L/min。

(2) 往复式隔膜泵。主要是砂浆泵, 用于输送粒度小于 2 mm 的细骨料压力灌浆, 灌浆压力为 1.5 MPa, 输浆量为 100 L/min。

(3) 计量柱塞泵。又名比例泵, 是一种行程可以调节的单作用立式柱塞泵, 它可按比例地输送弱酸性或

碱性的化学浆液或水泥浆液, 主要用于化学灌浆。灌浆压力为 1.5~3.0 MPa, 输浆量为 12.5~60 L/min。

此外还有螺杆泵等。

浆液搅拌机 有立式与卧式二种。常用的是立式双桶浆液搅拌机, 这是专为灌浆时搅拌水泥浆用的机械, 也可用它搅拌灌浆用的水泥砂浆和水泥粘土浆。一般桶的容积为 200 L, 也有自制成 300 L 或 500 L 的。在输浆量较大的灌浆作业中, 宜采用卧式连续式水泥浆搅拌机, 其容积多为 1~2 m³。

(姜青燕)

guanzhuang shiyan

灌浆试验 (grouting test) 见灌浆。

guangmian baopo

光面爆破 (smooth blasting) 爆破开挖时, 沿设计开挖轮廓钻孔装药, 在开挖区主爆破孔之后起爆, 以获得比较平整壁面的爆破技术。光面爆破可以减少爆破对保留岩体的破坏, 开挖面的岩石壁面平整, 超挖量小, 在需要同填混凝土的部位, 也可减少混凝土量, 还有利于采用锚喷支护。过去, 为控制超挖常采用的方法是沿着开挖边界钻一排密集的不装药的钻孔, 称防震孔, 为爆破破碎提供一个薄弱面。20 世纪 50 年代初期, 瑞典首先采用了光面爆破方法。在水电工程中, 光面爆破技术广泛应用于地下工程和露天的岩基开挖。

光面爆破的主要内容和特点是: ①沿开挖轮廓钻周边孔。周边孔的孔距 (E) 和周边孔抵抗线 (W) 的数值, 视炮孔直径和岩石类别而定。一般要求 $E/W \leq 0.8$ 。当采用 40~50 mm 炮孔直径时, 对于中硬岩, E 可取 45~60 cm。②宜采用低猛度、低爆速、传爆性能好的炸药。装药量少并且分布均匀。根据炮孔直径和岩石的类别, 确定线装药密度, 即每米孔深的装药量。③采用药卷直径小于炮孔直径的不耦合装药结构, 在地下开挖工程中, 当炮孔直径为 40~50 mm 时, 药卷直径可为 20~25 mm。④周边炮孔在主爆区炮孔之后起爆, 常采用毫秒爆破, 并要控制好起爆时差。

(王庭济)

guang tanxing shiyan

光弹性试验 (photoelasticity test) 利用透明光敏材料受力后产生的双折射现象确定应力的实验技术。它是实验力学的一个重要分支。用光学敏感的材料制成和原型相似的模型, 施加相应的载荷, 就产生人工双折射现象, 在偏振光场里观测, 可得到主应力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) 和主应力倾角 θ , 根据这两个参数算出构件边

缘和内部的应力。

光弹性试验有平面光弹性试验、三维光弹性试验和光弹性贴片法三种。①平面光弹性试验,可将模型放在光弹仪中直接加载施测。②三维光弹性试验,要用冻结法将应力冻结在模型里,然后将模型切成薄片,再在光弹仪中进行观测,求得次主应力差和次主应力倾角等参数。试验数据经计算处理,可求得三维构件内部和表面的应力。模型可在烘箱内加面力后将应力冻结,也可在离心机内加体力后用相应升温降温方法将应力冻结。③光弹贴片法,将光弹性薄片贴到实物要研究应力的部位,然后在实物上加载,用反射式光弹仪观测,可以计算出实物的表面应力。

光弹性试验可用来研究各种复杂构件的应力状态。对于求解应力集中问题,更是其它试验和计算方法所不能比拟的。它的应用范围极广,既可用于研究机械零件,又可用于土木水利工程结构、结构动力学、温度应力、断裂力学等课题的研究。对实际工程来说,光弹性试验结果具有足够的精度,且直观性强、可靠性高。

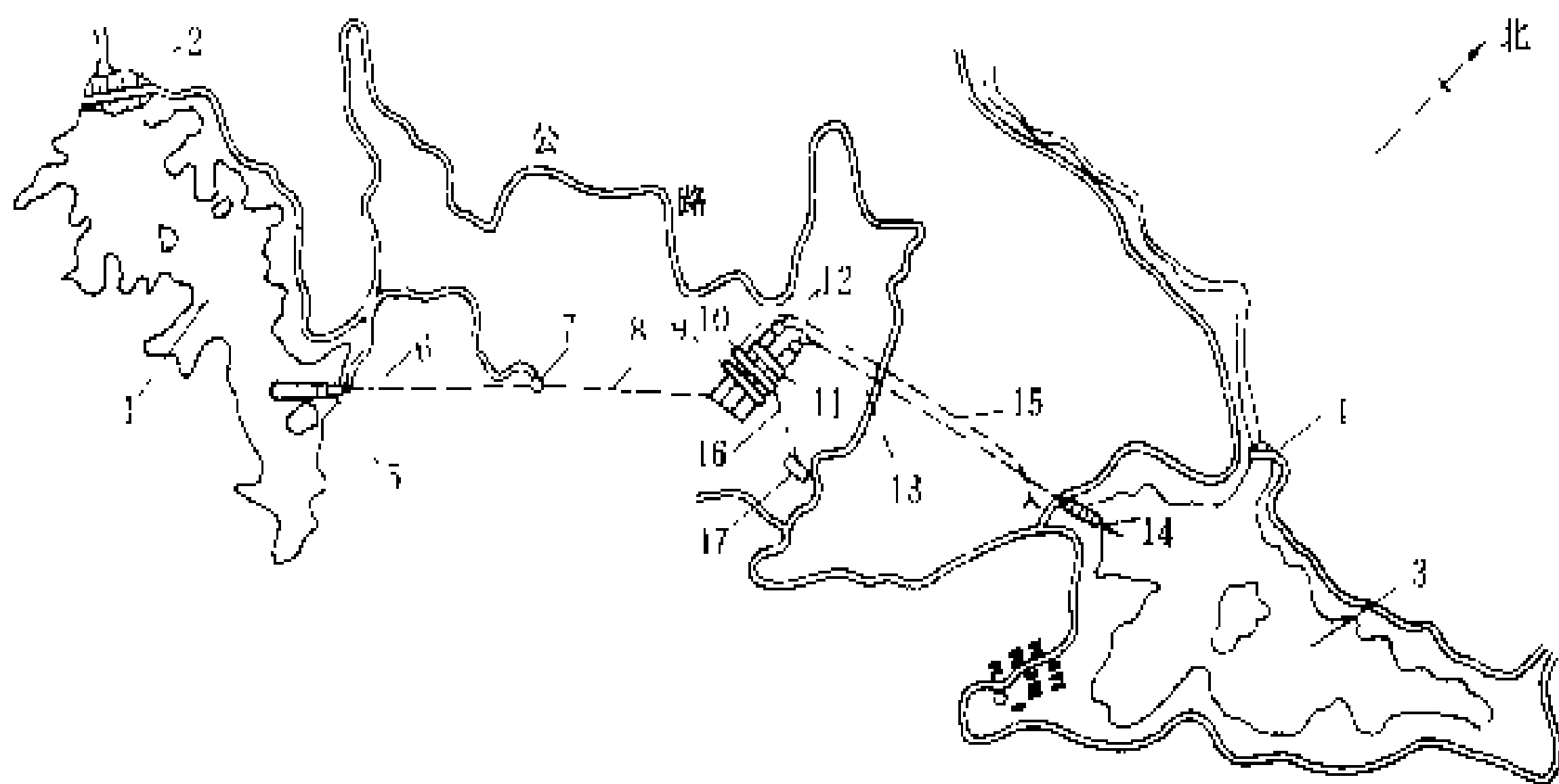
光弹性试验在20世纪初出现于工程界,由E. G. 科克尔(E. G. Coker)和L. N. G. 菲伦(L. N. G. Filon)的研究而发展成一门独立学科。国外在20世纪30年代就广泛应用于机械零件设计和桥涵应力状态的研究。中国在20世纪50年代初开始用光弹性试验研究空腹重力坝的应力,以后推广使用于各种大坝、水电站厂房结构、地下建筑物、管道、水轮机叶片、火电站冷却塔基础、核电站压力容器、海上石油平台等。现在正研究数据采集和图象处理自动化,以缩短试验周期和提高精度。

(张晓宇)

Guangzhou Choushui Xu'neng Dianzhan

广州抽水蓄能电站 (Guangzhou Pumped Storage Power Station) 位于广州市从化县吕田镇,距广州市直线距离90 km。上水库位于召大水上游的陈禾洞小溪上,下水库位于九曲水上游的小杉盆地。上下水库间引水距离约3 km,水位落差约500 m。电站规划装机2400 MW,分两期建设。一期工程装机1200 MW,低谷负荷时抽水蓄能,平均每年吸收电量31.4亿kW·h;负荷高峰时发电,平均年发电量

23.8亿kW·h。电站以2回500 kV输电线路接入广东电力系统,配合大亚湾核电站运行,以解决华南电力系统调峰填谷的需要。电站于1988年9月开工,第一台机组于1993年8月投产。枢纽总布置见图。



广州抽水蓄能电站枢纽总布置图

1—上水库;2—上水库坝;3—下水库;4—下水库坝;5—上水库进(出)水口;6—引水隧洞;7—上调压井;8—高压隧洞;9—地下厂房;10—主变压器和开关室;11—尾水闸门廊道;12—尾水调压井;13—尾水隧洞;14—下水库进(出)水口;15—进厂交通洞;16—高压电缆洞;17—出线场

上水库和下水库 上水库坝址以上流域面积5 km²,多年平均流量为0.209 m³/s。正常蓄水位810 m,相应库容1700万m³;死水位797 m,相应库容700万m³,调节库容1000万m³。主坝为混凝土面板堆石坝,(参见彩图插页第35页69图)最大坝高68 m。按万年一遇洪水校核,溢洪道为岸边侧槽式。

下水库坝址以上流域面积13 km²,多年平均流量0.544 m³/s,正常蓄水位283 m,相应库容1750 m³。死水位275 m,相应库容750万m³,调节库容1000万m³。下水库坝为碾压混凝土重力坝,(参见彩图插页第35页70图)最大坝高43.3 m。按万年一遇洪水校核,溢流坝段设有2孔宽9 m的溢流孔。

引水系统 采用“一洞四机”布置,引水洞线总长3751 m。其中,上平段长925.77 m,洞径9 m,与上调压井相连接,后为两级斜井,长1066.22 m,洞径8.5 m;下弯段后为设计水头高达775 m的“卜”形钢筋混凝土岔管,用4条直径8.5~3.5 m的支管进入厂房与水轮机连接。尾水隧洞洞径9 m,总长1521.013 m,设2个下调压井,上下调压井均为阻抗式。上调压井,大井直径25 m,升管孔直径14 m,阻抗孔直径6.3 m。下调压井,大井直径14 m,升管直径5.6 m,阻抗孔直径4 m。

厂房和电气设备 地下主副厂房长146.5 m,宽21 m,高44.54 m。安装4台单机容量300 MW,竖轴单级混流可逆式水泵水轮机和发电电动机组。水泵水轮机转轮直径3.985 m,转速500 r/min,吸出高度

guo 过

—70 m。发电工况最大水头 537.18 m，最小水头和额定水头 504.29 m，最小（额定）水头时出力 347.7 MW。抽水工况单机流量 60.03 m³/s，最大扬程 550.01 m，最小扬程 514.14 m。最大扬程时输入功率 326.08MW。发电电动机为竖轴三相空冷半伞式，额定电压 18 kV。发电时，单机容量为 300 MW，功率因数 0.9。抽水时，容量 309.2 MW，功率因数 0.95。采用自并激晶闸管静态励磁。电动机起动采用静止变频器和背靠背同步起动两种方式。

主变压器和高压配电装置室位于厂房下游侧，长 144.24 m，宽 17.24 m，高 27.4 m。内装有单台容量为 340 MV·A 的 500 kV 强油水冷三相变压器 4 台和 500 kV 气体绝缘金属封闭电器（参见彩图插页第 29 页 55 图）。500 kV 出线 2 回，用电缆经电缆洞引出。

工程量 主体工程量为：土石方明挖 149 万 m³，地下洞挖 86 万 m³，土石方填筑 31 万 m³，混凝土浇筑 25 万 m³，钢材 1.38 万 t。

设计和建设单位 广东省水利电力勘测设计院设计，广州抽水蓄能电站联营公司负责建设。

（袁 玖）

guo ba sheshi

过坝设施 (facilities for passage over dam)

使船、木（竹）、鱼等通过闸、坝的建筑物和机械设备。过坝方式有水力过坝和机械过坝两种。水力过坝通常借闸室内水位升降使船、木、鱼等过坝；机械过坝则借机械运送过坝。前者要消耗一定具有势能的水量；后者消耗一定电能，基本不消耗水量，且所耗的能量常较前者为少。过坝设施的布置要协调好与水电枢纽中

其他水工建筑物的关系，避免相互干扰。如过船过木设施宜靠近岸边，上下游要满足引航道、集散设施的布置和水流条件的要求，并尽可能远离泄洪建筑物。鱼道的位置、水流流速需适应过坝鱼类的习性及其游行线路。

过船设施 有船闸和升船机两种基本类型。

过木设施 是将木材从坝的上游传送到下游的设施。木材过坝有单根过坝和编排过坝两种方式，通常采用水力或机械传送。水力传送过坝有筏道和筏闸两种类型。筏闸与船闸类似，其尺寸和水流条件按过木要求设计。机械传送过坝有过木机、起重机、索道等过坝方式。过木机多为置在土石坝坝坡或岸边的斜坡式过木机，大型工程也有采用垂直式过木机的。过木设施除过坝主体建筑物和机械设备外，还有停排、编排以及引航等设施。过木方式的选择，须根据过木数量、坝上、下游木材流送方式（单木还是木筏）、集散方式等具体条件经技术经济比较确定。中国紧水滩水电站在右岸设有木排过木机；铜街子水电站在右岸设有筏闸；柘林土石坝在坝坡上设有单根过木机；加拿大马尼克 3 级（Manic-3）土石坝上设有单根过木木筏道，通过架设在坝后和隧洞内的斜坡水槽将原木送到下游河道。

过鱼设施 常用的过鱼设施有：鱼道、鱼闸和收集并运载集鱼过坝的集鱼船、升鱼机等。鱼闸类似船闸，将下游的鱼诱人闸室，关闭闸门，上升闸室水位，然后开放闸室的上游闸门，使鱼出闸过坝，鱼从上游到下游的程序与此相反。集鱼船和升鱼机是将过坝的鱼引诱入特制的船内或放在升鱼机的集鱼箱内，用船闸（对集鱼船）或机械运送过坝的设施。

（李浩钧）



Hai He shuixi shuinneng ziyuan

海河水系水能资源 (hydropower resources of Haihe river system) 据 1980 年《中华人民共和国水力资源普查成果》统计,海河水系水能资源理论蕴藏量为 202.4 亿 kW·h/a,仅占中国的 0.34%;其中可能开发资源 37.19 亿 kW·h/a,占中国的 0.19%。

海河水系流域面积 26.46 万 km²,河流分散,习惯上划分为潮白河、永定河、大清河、子牙河和漳卫河五大支流。各支流相继会合,至天津市始称海河并出海。各支流发源于燕山和太行山,水能资源集中于各支流上游的峡谷段,由于河道短、流域面积小,径流量较少,可能开发的水电站全部为中小型。其中已建的密云和官厅水库,以防洪为主结合发电。电站装机分别为 7.6 万 kW 和 3 万 kW。

(赵毓崑)

hangkong sheying celiang

航空摄影测量 (aero-photogrammetry) 利用装有摄影仪器的航空飞行器,在空中对地面进行的摄影测量。摄影仪器有规律地连续拍摄瞬间地表信息于胶片,经摄影处理、外业像片联测与调绘、空中三角测量加密等步骤测定地物和地貌的形状、大小和空间位置。过去主要用于测绘地形图,现在随着飞行技术、获取信息的设备、摄影材料和处理方法的迅速发展,影像获取从可见光发展到紫外、远红外谱段及微波等,已扩大应用于地质、农林和环境评价等各种专题信息提取,编制专题地图,提高了经济与社会效益。可以根据不同的用途,综合应用航片的几何信息和物理信息。

航空摄影 通常采用竖直摄影,特殊需要可采用倾斜摄影。当摄影无需重叠时,为单片摄影;仅航线方向有重叠为航线摄影;既要航向重叠,又要相邻航线间旁向重叠时为区域摄影。摄影之前应根据目的拟定航摄计划,确定选用的摄影相机、摄影比例尺、航高、航向、像片重叠度和摄影倾角、航偏角、航向弯曲、航迹线偏离中心线等技术要求。采用立体测图仪测图,以特宽角和宽角摄影为宜,在山地和高山地一般采用常角

或宽角摄影,还可选用彩红外摄影、多谱段摄影或侧视雷达成象。

摄影处理一般是把空中摄影的胶片,在暗室经显影、定影、漂洗、晾干、晒印或放大像片供外业联测和调绘,拷贝涤纶片供加密与测图。

航测外业 包括像片控制点(简称像控点)的联测(简称像片联测)和像片调绘。像片联测是根据像片控制点的布设要求,在实地选测像片上的明显地面点或航摄前所设的地面标志点,测定其坐标或高程,像控点分平高点、平面点和高程点 3 种。像控点的布设方法有:①全野外法。测图所需控制点全部在野外选测测定,无需内业加密。②航线网或区域网布点法。以一条航线为解算单元或以几条航线组成的区域作为解算整体,经野外选测测定必要量的控制点,经内业空中三角测量加密控制点,满足测图要求。像片调绘是把像片上显示和没有显示而成图必需的地物和地貌元素、地理名称、境界等,经像片判读、调查和补测,并用图式符号、文字注记等绘注在像片上,作为测图的依据。

空中三角测量 利用像片内在几何特性进行加密控制点的方法。过去控制点的加密,平坦地区一般采用辐射三角测量法,丘陵或山区采用立体测图仪建立的单航线模拟空中三角网作控制点的加密,以减少外业控制联测工作。自电子计算机应用于空中三角测量计算以后,以采用量得的像片坐标为依据,与地面点坐标的解析关系或每两条同名光线共点的解析关系,构成摄影测量网的解析空中三角测量,解算待定点的坐标与高程,同时可对航摄机物镜畸变、摄影材料变形、地球曲率、大气折光等物理因素引起的像点误差加以改正。模拟法因加密速度慢、精度差,已被淘汰。

区域网加密有三种方法:①航带法。在第一航线经相对定向、模型联接和绝对定向后,进行第二条航线的绝对定向,利用相邻模型间公共连接点进行模型连接运算,以建立比例尺统一的航带立体模型,求得待定点的坐标。②独立模型法。把一个单独模型、双模型或者几个单模型组成的模型视为一个刚体单元(即独立模型),在整体平差过程中,对每个独立模型只作平移、旋转和缩放,以达到在整个区域内相邻独立模型的同名点的摄影坐标相等,控制点的摄影坐标等于野外实测坐标,把多个独立模型组成的区域网进行平差的加密方法。③光线束法。以摄影中心点、像点、地面点的三点共线为条件,以单张像片为一个解析单元,借助像片之间的公共点,把每张像片连成一个区域,对一个像点的观测列出两个相应的误差方程式、解算其所构成的方程式,完成区域网的加密工作。

立体测图仪测图 摄影过程的几何反转。单片测图是中心投影的透视变换,广义讲也是几何反转。总

之,要把中心投影转变为正射投影。可采用以下几种方法:

(1) 航测综合法。摄影测量与平板仪地形测量相结合的一种方法。其地物的平面位置以纠正仪纠正后的航片经调绘确定,等高线以平板仪在野外测定。此法适用于平地或小面积高差不大的丘陵地区。

(2) 航测微分(分工)法。作业过程分平面与高程两部分进行。等高线是用立体量测仪在像片上测绘。地物通过野外调查画在像片上,地物与等高线在图板上的位置是用缩小后的底片通过分带纠正进行投影转绘解决。此法适用于丘陵地区,现已基本不用。

(3) 航测全能法。包括模拟测图和解析测图。所谓模拟测图即一架模拟测图仪通过机械传动与绘图桌相连,通过相对和绝对定向重建与实地相似的立体模型,然后在立体模型上测绘地物与地貌,获得航测原图的方法。解析测图方法是用数学计算方法建立起立体模型的解析测图与电子计算机和数控绘图桌相连接,既可在绘图桌上绘图输出,也可把采集的地物、地貌数据存贮在计算机里,经处理后建立的数字地面模型(DTM)和数字高程模型(DEM),是地理信息系统和地图数据库的基础。数字地面模型则可供工程设计、正射纠正仪制作正射影像图或正射影像地图。

全自动化数字摄影测量是今后发展的方向。将由数字影像或数字化影像出发,通过计算机对数字信息加工,以获得所需要的图形和数字信息。目前对数字相关、影像匹配已有一定进展,模式识别及其他数字图像处理将逐步推进。

(茅玉清)

hechuangshi changfang

河床式厂房 (water retaining power house) 位于天然或人工开挖的河道上兼有壅水作用的水电站厂房。它适用于水头小于40余m的水电站。

大中型水电站河床式厂房多安装立轴轴流式机组(如图1)。过流部分由进水口、钢筋混凝土蜗壳(有的带有钢板里衬)和肘形尾水管组成。主厂房位于中部,其上部配备供机组安装及检修使用的桥式起重机。进

水口要淹没在上游发电最低水位(即死水位)以下一定深度,设有拦污栅和闸门,工作平台上配备有启闭机,

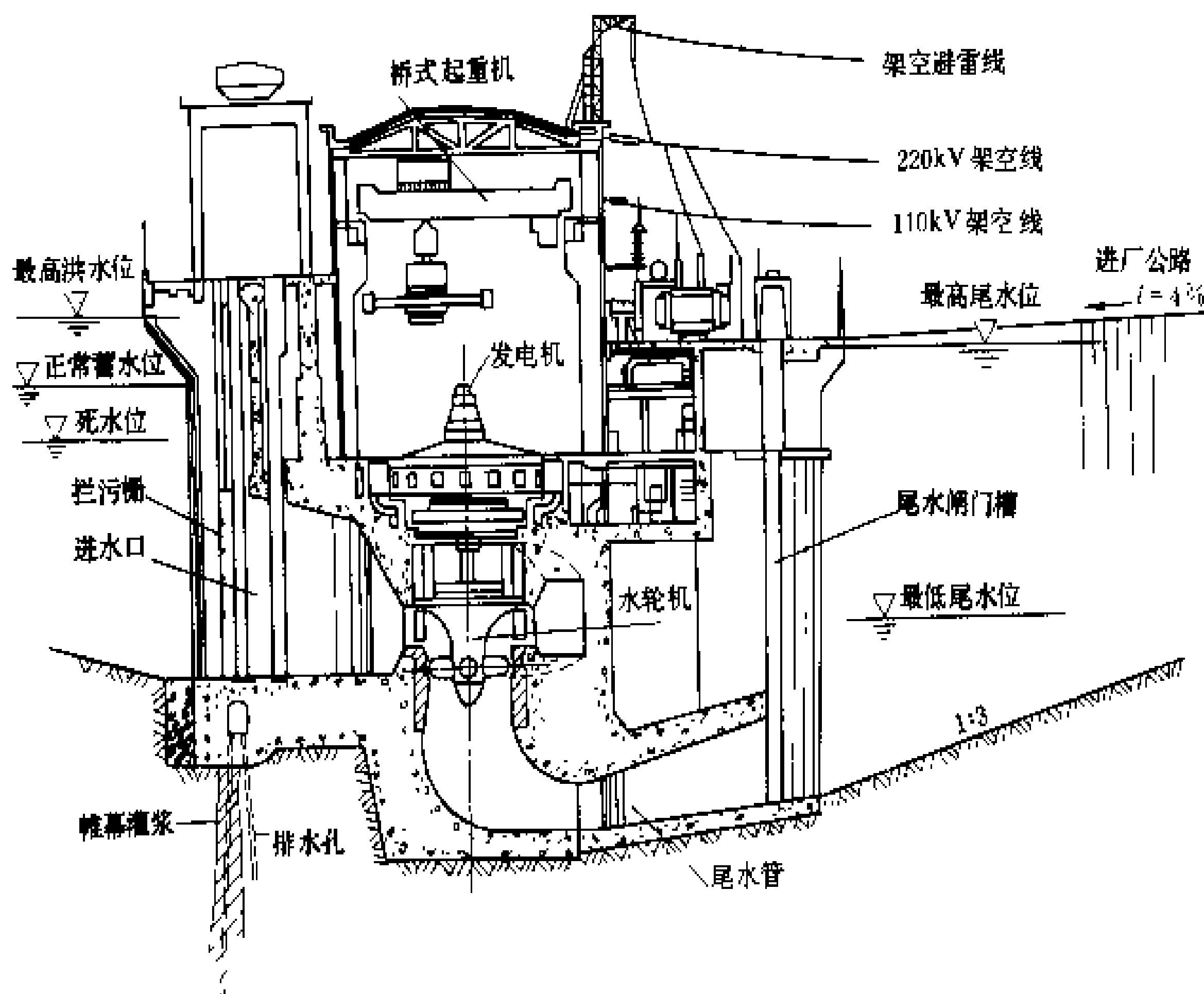


图1 河床式厂房横剖面

其上游挡水高程按拦河坝要求确定。大中型机组的进水口至蜗壳入口的流道以及肘形尾水管的扩散段需要的过水断面面积大,结构上通常要增设1~2个分流支墩,将过水断面分成两孔或三孔。尾水管出口段设有尾水闸门和配套的启闭操作机械。小型水电站也有的采用开敞式进水室和竖直尾水管的。

有的河床式厂房兼有泄流和排沙作用,布置形式有:①泄流排沙底孔进口设在混凝土蜗壳下面,出口设于尾水管上面,例如中国长江葛洲坝水电站厂房,其泄流排沙底孔的工作闸门设在出口,进口仅设检修闸门。泄洪期间由于射流效应使尾水管出口水位低于下游洪水位,因而增加一些出力,但射流作用也使尾水渠流态复杂化,故尚需根据地质情况加强保护。②为了增加水电站泄洪能力,在混凝土蜗壳上面设置泄水道,例如苏联伊尔库茨克水电站厂房。③溢流段与机组段相间布置,水轮发电机组安置在兼作溢流坝的闸墩中,例如中国青铜峡水电站厂房。

20世纪60年代后,贯流式水轮机得到发展,用于水头10~15m以下的低水头水电站。贯流式水轮机通常为卧式布置,没有蜗壳,转轮安装在引水管道内,通过连轴或同轴与引水管外发电机连动。若发电机也安装在引水管道内,水流从发电机外壳流过,则称为灯泡贯流式机组(如图2)。运行中的灯泡贯流式机组的单机容量已达5.4万kW。

河床式厂房横跨河道,常常成为连接两岸通道,有

的工程利用厂房上游进水口工作平台加宽,有的利用尾水平台加宽,架设交通桥,进厂交通多由下游公路或

施工阶段的河道测量 即河道工程的实施测量。主要内容是河道及有关建筑物如坝、堤、涵、闸及枢纽的施工定线与放样的测量。

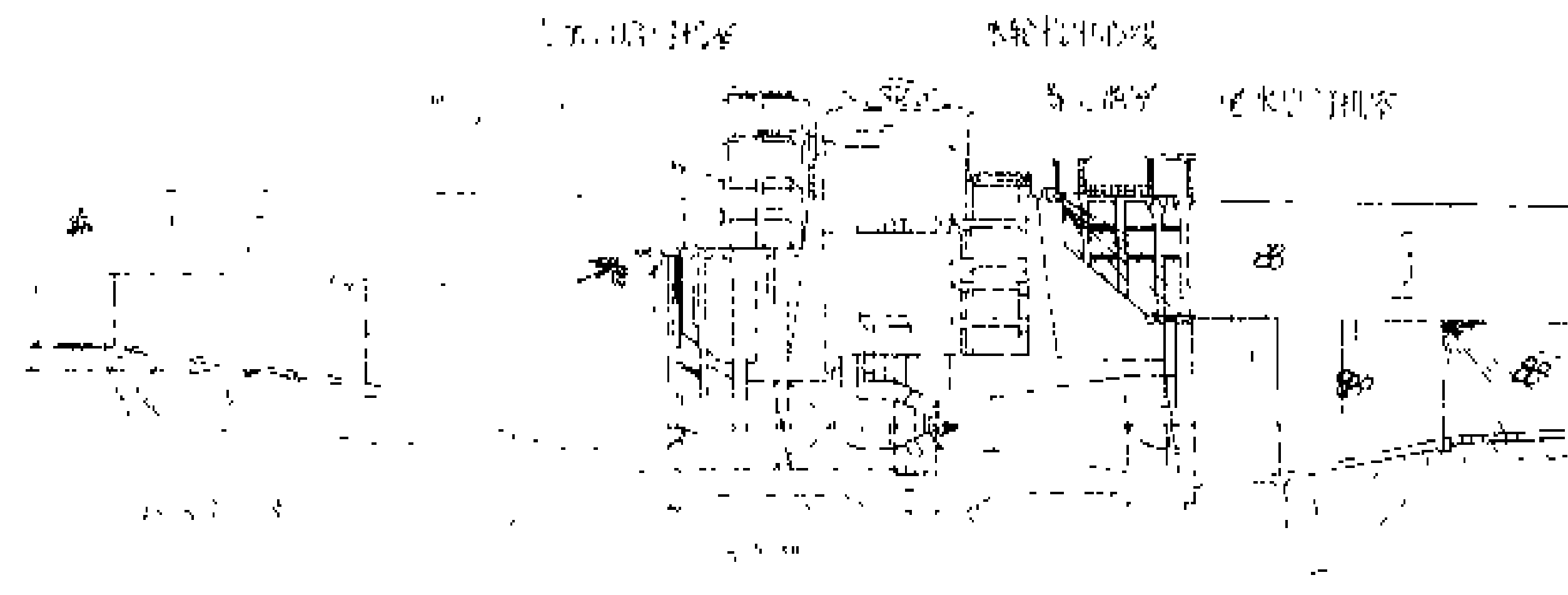


图 2 灯泡贯流式机组厂房横剖面

铁路直抵安装间,尾水位变幅很大的水电站采用了竖直运输和交通。副厂房常布置在进厂交通入口处,主变压器布置于尾水平台上,开关站设在岸边;也有的将副厂房布置在主厂房的下游侧,主变压器场布置于进厂交通道的近旁,开关站设在厂房屋顶或河岸;尾水位很高的水电站也有时将主变压器及部分副厂房置于主厂房的屋顶上。

(李必如)

hedao celiang

河道测量 (river course survey) 对河流及两岸某一范围进行的地形和纵、横断面测量。主要包括规划设计阶段的河道测量、施工阶段的河道测量和运行管理阶段的河道测量。

规划设计阶段的河道测量 一般进行 1:10000~1:25000 比例尺的带状地形图、河道纵横断面、沿河重要水工建筑物与水文(位)站的有关高程联测、瞬时水位测量,历史最高洪痕点的调查与地下水位孔、井等的测注,专题进行的土地利用、水土流失、洪涝淹没、古河床调查、河口淤积监测等。设计阶段还要进行库区、灌区、河道疏浚及堤防工程及有关环境评价中的测量,测绘 1:5000 或 1:10000 地形图、各种断面水库淹没线、土地赔偿、清库与移民界线等的测量工作。但为了精确推求河流或河段比降和实地标定水库移民与各种淹没范围界线,需进行瞬时水位测量与水库淹没界线测量。其方法:①应用地面测量手段与技术、按不同内容与精度要求进行测绘或高程联测,具体作业见地形测量、断面测量、平面控制测量、高程控制测量等。②采用实地调查、联测方法,将成果绘注于地形图上。③应用摄影测量与遥感信息载体 航片与卫片,经解译或图像处理等方法,以高速、多手段提取各种专题信息,编制各种图件、文字及数据资料,为规划设计提供可靠、正确的科学依据。

宜布置平行于路线中心线的辅助导线。

中心导线的平面位置,可用电磁波测距仪或量距经纬仪导线等方法测定,并在横断面位置及建筑物中心留点,以供后续工作中使用。高程应用五等水准联测。对折角处的弯道,应测设曲线,并埋设三个以上木桩固定其位置和计算曲线长度。桩位以里程编号,以作施工放样依据。

施工放样见施工测量。

运行管理阶段的河道测量 主要内容有:河道、堤防的安全行洪和疏浚、维护等方面的测量;河道建筑物运行监测与河口变迁的监测等。其方法可采用现有的测量手段与技术。

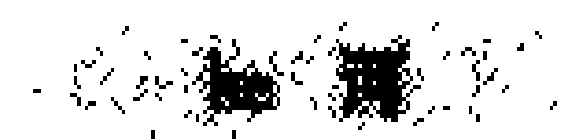
(茅玉清)

heliu guihua

河流规划 (river planning) 为合理利用水资源,制定治理开发方案的设计研究工作。它是指在一条河流所处的地域范围内,根据各类能源资源分布、社会经济发展及各部门用水需求等情况,确定合理的河流水资源综合利用方案。河流规划包括对发电、航运、防洪、工农业和生活用水、养殖、旅游等方面的规划。

河流规划以一条河流为对象,或是干流,或是一条支流。如果干支流所在地域的社会、经济发展对水资源的开发利用都有较大要求,且规划所要求的社会、经济发展条件和各种自然资源都基本具备,这些干支流应一起进行规划,或对全水系进行规划。如果河流较长,其上、中、下游各个河段所在地域的社会、经济发展对河流水资源的开发利用要求,在时间上相距很远,并且上下游、干支流各自规划对河流整体规划影响不大时,也可以分段进行规划。

规划内容 包括:①根据河流特点及国民经济发展要求,提出河流水资源开发目标;开发任务、利用程度(如水能开发规模、供水规模、河段防洪标准、通航



标准和灌溉发展面积等)及各利用部门的主次关系;②选择河流梯级方案:梯级组成、上下游工程之间的水位衔接(见梯级水电站)、各工程的开发方式及其所承担的水资源利用任务等;③梯级内各工程的开发时序;④河流开发前后的环境条件变化及其评价。

规划原则 规划中要正确处理需要与可能、近期与远景、整体与局部、干流与支流、上游与下游、资源利用与环境保护的关系。以国民经济效益最大或在满足同等效益前提下总费用最小为目标,并考虑各种非经济因素,确定规划方案。规划中,还要注意协调解决水资源各利用部门的要求和有关地区的权益。

规划基础资料 包括:①规划范围内的自然条件,如水文、地形、地质、交通、气象、环境等;②地区国民经济现状、发展规划和水资源利用各部门对本河流开发治理的要求;③水资源各利用部门采取其他工程或非工程替代措施的可能性及相应的代价;④制约条件,如某些河段不允许淹没的最高水位、跨流域引水的最大水量、河段或河口的最小流量等。

规划方法与步骤 采用多方案技术经济比较的规划方法。其工作步骤为:①根据基础资料初定水资源利用各部门的目标。②根据初定目标结合河流自然条件拟定若干个梯级比较方案。在拟定比较方案时,要考虑各方案协调各部门和上下游要求的可能性、与地区经济发展的适应性和工程设施在技术上的可行性等。③对各梯级方案分别进行径流调节计算、调洪计算、系统电力电量平衡等计算,分析各方案对水资源利用各部门要求的满足程度和相应的效益。④对各梯级开发方案进行工程布置研究并计算工程量及所需投资。⑤对淹没影响大、移民多的水库工程还要研究移民可行性和相应费用。⑥对梯级方案间效益的差别要考虑采用工程或非工程替代措施,并计算其相应费用或损失。⑦分析各方案对环境的有利、不利影响。⑧进行各方案的技术经济比较,据上述规划原则选择梯级方案。⑨与国民经济发展过程相适应,并通过经济比较选定梯级方案内各工程的开发时序,有时工程开发时序和梯级方案同时选定。

(赵毓崑)

heliu nisha

河流泥沙 (river sediment) 河流中随水流输移或在河床、滩地上发生冲淤的岩土物质颗粒。岩石风化后的岩土是河流泥沙最主要的来源。当暴雨降到流域地表,在产流和汇流过程中,侵蚀坡地及沟壑的岩土,经水流输移到河流,形成河流泥沙。河流在输送泥沙过程中,还会冲刷河床或河岸,进一步增加泥沙量。当河流进入下游平原区时,比降减小,流速减缓,水流

挟带的部分泥沙将沉积在河床或滩地。河流在入海口附近因流速锐减,泥沙将沉积在河口附近海域。

河流泥沙可以形成广阔肥沃的土地,提供丰富的建筑材料,为人类造福。但河流挟带过多的泥沙,造成河道、湖泊及水库淤积,降低防洪、发电、灌溉、航运等效益,从而给水资源开发利用带来一系列问题。

研究泥沙的冲刷、输移和沉积过程的学科,称为泥沙运动力学。在水利水电、航运和交通等建设中一门应用学科 河流泥沙工程学逐渐形成。它以泥沙运动力学为基础,主要研究与工程有关的泥沙问题。

泥沙物理性质 主要是几何特性和重力特性。几何特性包括泥沙颗粒形状、大小及群体组成。泥沙颗粒的大小用颗粒的直径表示。泥沙形状不规则,粗颗粒常用三轴平均粒径表示,细颗粒用沉降粒径表示。河流泥沙皆为大小颗粒混合的群体,用级配(小于某粒径的泥沙占全部泥沙的重量百分数)曲线表达泥沙颗粒组成特性。泥沙重力特性为颗粒的重率和沙样的干容重。重率是泥沙颗粒单位体积的重量,构成泥沙的矿物成分不同重率也不一样,一般为 $2.6\sim 2.7\text{ t/m}^3$ 。干容重为单位体积原状沙样烘干后的重量。它与颗粒重率的差别取决于沙样的孔隙率。

泥沙运动基本规律 包括泥沙的沉速、泥沙的起动、河流的沙波运动、河道阻力、推移质运动、悬移质运动以及水流挟沙力等。河流泥沙运动的特殊形态还有,高含沙水流和泥石流的运动特性、异重流的运动特性、波浪作用下的泥沙运动特性等。

根据河流中泥沙运动的形式,把泥沙区分为推移质泥沙和悬移质泥沙。推移质泥沙是指在河床面上滑动、滚动或短时间跃离然后又落回床面的泥沙颗粒;悬移质泥沙是悬浮在水流中随水流运动的泥沙颗粒。在一定水流条件下,这两类泥沙可能同时存在,它们相互之间以及和床沙之间不断存在着交换。

冲积河流中挟沙水流的运动是一种相当复杂的现象。在运动过程中,水流和泥沙相互发生作用。一方面水流通过消耗其紊动能能量挟带和输送泥沙;另一方面,泥沙的存在又反过来改变水流的物理性质和水流结构,从而影响水流中能量、流速和含沙浓度。特别当水流中泥沙含量较高时,不能忽视泥沙对水流结构的影响。

水利水电工程中的泥沙问题 在中国江河治理和水电建设工作中,泥沙问题十分突出,不少江河上游水土流失严重,大量泥沙进入河道,使治理工作十分困难和复杂。根据1981年的统计,全国水土流失面积为150余万 km^2 ,年输沙量在1000万t以上的河流有42条,直接输送入海的泥沙每年达19.4亿t。

表中列出了中国及世界主要江河的输沙情况,其

中黄河是来沙量最多的河流，大量的来沙在河道中堆积，使黄河下游形成了地上河，堤内滩地高出两岸地面3~5 m，一旦洪水决口，将会给华北平原的经济建设和人民的生命财产带来巨大的损失。我国的东北和南方的河流，由于流域内地质和植被条件较好，土壤侵蚀相对较轻，有利于水利资源的开发和利用。

水利水电工程中的主要泥沙问题有以下几方面。

(1) 泥沙在水库中沉积会侵占水库的调节库容，减少水库调节能力，降低水库的防洪能力和兴利效益。

水库中泥沙的沉积还会使水库回水上延，抬高上游地区的洪水位，增加淹没损失和浸没损失。

(2) 泥沙在水库变动回水区淤积可能导致航深不足，发生碍航现象。

(3) 低水头枢纽或已淤至平衡阶段的水库，泥沙推进至坝前，可能产生电站进水口淤堵，泥沙进入水轮机组造成磨损等问题。

(4) 对于具有通航建筑物的水利枢纽，通航建筑物上下游引航道中的泥沙淤积会引起通航的困难。

世界各大河流的挟沙情况（按含沙量顺序排列）

序 号	河 流	国 别	流域面积① (km ²)	年 水 量 (亿 m ³)	年 沙 量 (亿 t)	平均含沙量 (kg/m ³)
1	黄 河	中国	687869	426.4	16.0	37.5
2	科罗拉多河②	美国	637000	49	1.35	27.5
3	辽河	中国	136391	56.5	0.33	5.86
4	恒河②	印度、孟加拉	955000	3710	14.51	3.92
5	密苏里河②	美国	1370000	6160	2.18	3.54
6	印度河②	巴基斯坦	969000	1750	4.35	2.49
7	布拉马普特拉河②	孟加拉、印度	666000	3840	7.26	1.89
8	尼罗河②	埃及、苏丹	2978000	892	1.11	1.25
9	红河②	越南	119000	1230	1.30	1.06
10	伊洛瓦底江②	缅甸	430000	4270	2.99	0.70
11	密西西比河②	美国	3220000	5610	3.12	0.56
12	湄公河②	老挝、泰国、柬埔寨、越南	795000	3480	1.70	0.49
13	长江②	中国	1700000	9336	4.31	0.46
14	西江②	中国	330000	2526	0.86	0.34
15	顿河②	俄罗斯	422000	280	0.06	0.23
16	尼日尔河②	尼日利亚	1112000	1800	0.40	0.22
17	多瑙河②	德、奥、捷、匈、南、保、罗	1165000	2000	0.28	0.14
18	伏尔加河②	俄罗斯	1500000	2500	0.25	0.11
19	亚马孙河②	巴西	5770000	57100	3.63	0.06
20	刚果河②	扎伊尔	3700000	14000	0.70	0.05
21	莱茵河②	德国、荷兰、法国、瑞士	362000	800	0.03	0.04

① 流域面积系指表中所列水沙相应测站控制的流域面积。
② 引自 Todd D. K. Water Encyclopedia. Water Information Center, 1970。
③ 引自钱宁，周文佑，黄河下游河床演变，北京：科学出版社，1965。

(5) 泥沙在引水渠系中的淤积会导致引水流量不足，供水效益降低，并耗费大量淤淤的人力和物力。

(6) 在水库拦蓄泥沙后，清水下泄可能造成下游河道的冲刷下切及河道展宽，甚至引起河势变化，影响堤防、护岸、取水建筑物等工程设施的安全和效益。

(7) 平原河道中累积性的泥沙淤积会抬高洪水位，降低河道宣泄洪水的能力，增加洪水的灾害和损失。

(8) 航道港口及河口的泥沙淤积，影响航运及河口演变。

河流泥沙问题的研究方法 可以概括成 3 个方面：①室内的水槽试验和实物模型的试验研究；②通过

数学模型对泥沙问题进行计算和分析；③利用野外观测资料和已建工程的原型观测资料进行分析。目前泥沙理论还不够成熟，通过不同途径，对生产中的泥沙问题进行多方面的综合研究是必要的。

简史 随着经济的发展，愈来愈多的河流被开发和治理。在实践中，人们对河流泥沙问题获得了广泛而深刻的认识。20 世纪初通过大规模灌溉渠系建设得到的渠道设计“均衡理论”(regime theory)和 30 年代美国胡佛(Hoover)坝建成后发现的异重流现象，就是两个生产实践推动泥沙理论发展的典型例子。中国有长期修筑堤防、治理河道的经验，明朝潘季训就有“以

he 河

堤束水,以水攻沙”的论述。近年来在生产实践推动下,中国河流泥沙的研究取得很大进展。例如利用来沙集中的汛期降低库水位排沙,保持调节库容长期使用;在引航道中设置冲沙闸,防止淤积,保证航运畅通;低水头枢纽利用弯道环流引水防沙;利用修梯田、地埂、植树造林等综合措施控制水土流失等;以及在高含沙水流和泥沙模型试验的理论和应用方面均获得了可观的成就。

(张 仁)

helu nisha wuli xingzhi
河流泥沙物理性质 (physical properties of river sediment) 主要包括河流泥沙的颗粒形状、重率、粒径和硬度等单颗粒性质,以及级配、干容重、孔隙率及水下休止角等群体性质。

泥沙颗粒形状各式各样。砾石、卵石经过磨损比较圆滑,沙类、粉土和粘土类泥沙颗粒多楞角状,外形不规则。重率为泥沙颗粒单位体积的重量。因构成泥沙的矿物成分不同,各种泥沙的重率也有差异,工程上通常采用其平均值 2650 kg/m³。

粒径 泥沙的大小常用其直径表示,简称粒径。较大且较规则的球形颗粒,通常直接量测或用筛分法确定其直径。较细且不规则的泥沙,不易直接测量其直径,通常根据泥沙的沉速反求与该颗粒比重相同、沉速相等的球体的直径作为代表粒径,称沉降粒径。也有用同体积的球体的直径表示泥沙颗粒大小的,称等容直径。

硬度 泥沙由岩石风化而成,不同矿物的泥沙硬度差别很大。高岭土的硬度最低,仅为莫氏硬度 1~2.5,石英的硬度高达莫氏硬度 7。

级配 实际工程中遇到的泥沙多是由大小不同的颗粒组成的混合沙。表征混合沙粒径的粗细常以级配曲线表示见图。该曲线为粒径与重量累积百分数(即小于该粒径的泥沙重占总重量的百分数)的关系。对于卵石、砾石和粗沙常用筛分法求级配曲线,对细沙和粉土常用比重计法或移液管法等水析法推求。

干容重 单位体积的原样沙样烘干后的重量。泥沙干容重的变化幅度很大,可从 300 kg/m³ 到 1700 kg/m³。泥沙粒径愈细,沙样空隙率愈大,干容重愈小;淤积泥沙的位置愈深,被上层泥沙压实,干容重愈大。此外,淤积历时长短及淤积物是否露出水面在空气中暴露等,对泥沙干容重的大小都有影响。

孔隙率 表示泥沙群体中孔隙的大小,可用下式计算

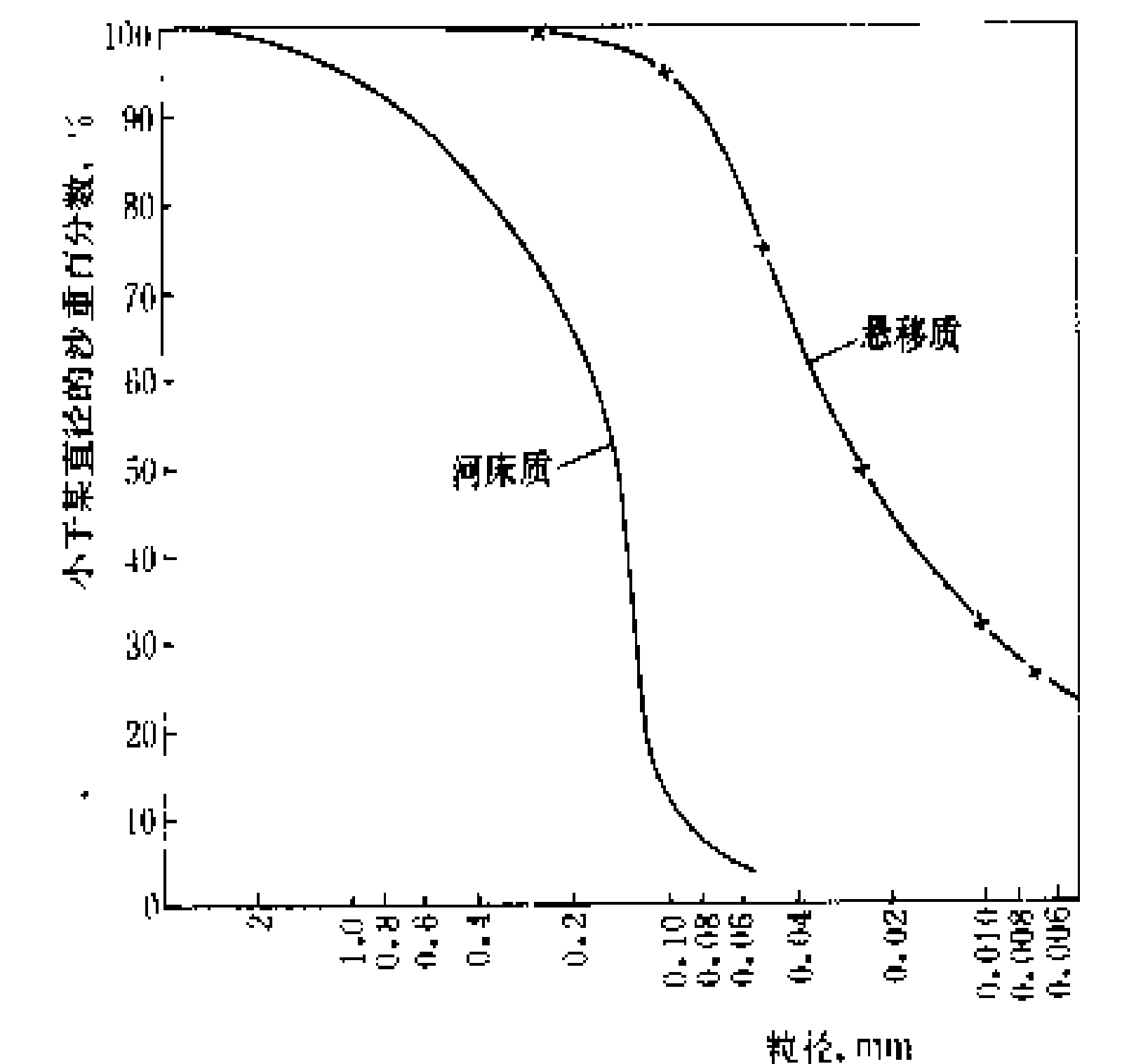
$$e = 1 - \frac{\gamma'_s}{\gamma_s}$$

式中 e 为孔隙率; γ_s 为泥沙重率, γ'_s 为干容重。

水下休止角 泥沙在水中,由于颗粒之间的阻力作用,在静止时自成坡面,坡面与水平面之间的夹角 θ 称水下休止角,

$$f_0 = \tan \theta$$

f_0 称为休止阻力系数。对于分散颗粒,休止阻力系数一般随粒径减小而减小,而孔隙率越大,休止阻力系数愈小。



颗粒大小级配曲线

(姜乃森)

Heilong Jiang shuixi zhongguo bufen shuine ng ziyuan
黑龙江水系中国部分水能资源 [hydropower resources of Heilong river system (within china)]

据 1980 年《中华人民共和国水力资源普查成果》统计,黑龙江水系中国境内部分水能资源理论蕴藏量为 1010 亿 kW·h/a, 其中可能开发资源量为 343 亿 kW·h/a。黑龙江水系中属于中国、俄罗斯两国界河的河段有额尔古纳河、黑龙江上中游及支流乌苏里江,这些河段的能量按中国和俄罗斯各半统计,中国部分资源量分布见表 1。

水系概况 水系跨中国、蒙古、俄罗斯 3 国。源流有两条:北侧源流称石勒喀河,在俄罗斯境内;南侧源流发源于蒙古,流经中国,在呼伦湖以上称克鲁伦河,以下称额尔古纳河。石勒喀河和额尔古纳河汇合后始称黑龙江。黑龙江在中国侧的主要支流有海拉尔河、呼玛河、松花江和乌苏里江。全水系流域面积 184 万 km², 在中国境内的面积约 90 万 km², 其中松花江的流域面积为 54 万 km²。

额尔古纳河及黑龙江上中游(干流)河段水能资源 额尔古纳河河长 920 km, 比降平缓,约 0.1‰~0.3‰,水面落差 200 m。黑龙江在黑河市以上的河段

为上游。上游河段长 895 km，平均比降 0.2‰。河道两岸为山间盆地或山谷，可筑坝形成大水库以调节径流，是干流中水能开发利用条件最好的河段。在额尔古纳河上，除 90 多 m 水头由黑龙江上游的漠河水电站开发利用外，还可建一座水电站，利用水头 100 m，中国可装机 180 MW，年发电量 8.94 亿 kW·h。黑龙江上游包括漠河水电站在内中国可装机 2025 MW，年发

电量 106.3 亿 kW·h。干流从黑河市到乌苏里江汇入口为黑龙江中游段。河长 995 km，平均比降 0.09‰。除在逊尧以下，萝北以上有局部峡谷段可开发利用水能资源外，其余河段为宽阔的河谷，两岸岸坡平缓且低洼，水能资源难于利用。在中游段中国可装机 900 MW，年发电量 28.3 亿 kW·h。以上河段至今都尚未开发利用。

表 1 黑龙江水系中国部分水能资源分布表

河流名称	流域面积 (km ²)	多年平均流量 (m ³ /s)	河道长度 (km)	水面落差 (m)	利用水头 (m)	理论蕴藏量 (亿 kW·h/a)	可能开发资源		
							电站座数	装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kW·h)
水系合计						1010.3	310	10962.4	342.72
其中：									
干流	1620000	8600	2820	460	400	256.2	6	3105	143.3
海拉尔河	49105	105.4	627	556	14	10.1	1	5.1	0.26
根河	15631	65.4	335	490	86	11.2	4	32.9	1.48
激流河	16667	107.9	449	698	178	22.7	2	304	9.33
额穆尔河	16280	92.0	469	761	167	17.9	3	176	5.46
呼玛河	29562	215.0	524	740	322	50.2	7	542.5	16.08
松花江	540000	2200	2002	520	190	578.0	229	6412.6	154.49
乌苏里江	190000	1700	473			14.3	4	19	0.54
其他支流						49.7	54	365.3	11.78

注：干流包括额尔古纳河和黑龙江上中游。各支流（如松花江）的水能资源量中包括其干流及支流的资源量。

松花江干流水能资源 松花江是黑龙江的最大支流，全在中国境内。松花江发源于伊勒呼里山，自北向南流，源流段称嫩江。嫩江和支流第二松花江汇合后始称松花江，自西北向东南流，于同江县汇入黑龙江。嫩江出口处多年平均流量 823 m³/s，松花江出口处多年平均流量 2200 m³/s。松花江干支流具有理论蕴藏量 578.1 亿 kW·h/a，可装机 6413 MW，年发电量 154.5

亿 kW·h。其中已开发水电站装机容量 2257 MW，年发电量 47.6 亿 kW·h。资源分布见表 2。

嫩江河长 1106 km，水面落差 441.8 m，具有理论蕴藏量 49.7 亿 kW·h/a。嫩江镇以上河段穿过丘陵地区，适于开发中小型水电站。嫩江镇以下河段比降缓，两岸开阔，除结合防洪、供水可能开发水电站外，水能资源利用条件不理想。嫩江干流可装机 713 MW，

表 2 松花江干流水能资源分布表

河 流 名 称	流域面积 (万 km ²)	多年平均流量 (m ³ /s)	河道长度 (km)	水面落差 (m)	利用水头 (m)	理论蕴藏量 (亿 kW·h/a)	可能开发资源		
							电站座数	装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kW·h)
松花江干支流合计						578.1	229	6412.6	154.49
其中干流：嫩江	22.2	823.4	1106	442	180.3	49.7	11	712.6	17.57
松花江	54.0	2200	896	78.4	9.3	129.2	1	176.0	6.14
支流：甘河及其支流	1.95	129.0	447	726	65	23.9	8	180.8	4.25
诺敏河及其支流	2.55	147.0	448	810	229.3	32.1	14	321.7	11.67
绰尔河及其支流	1.74	75.3	514	914	227.6	26.9	5	188.4	6.00
嫩江段其他支流						66.1	26	101.0	3.18
第二松花江：干流	7.43	538.0	803	1556	613.7	70.3	15	2943.1	57.81
二道河	0.95	121	290	1836	115.2	30.0	21	222.4	8.39
其他支流						22.2	23	161.7	6.26
牡丹江及其支流	3.71	301.1	705.4	868.7	333.1	61.8	50	1131.9	24.69
汤旺河及其支流	2.05	184.6	402	435	128.4	26.9	26	176.6	6.44
松花江段其他支流						38.7	29	96.4	2.09

Hong 红

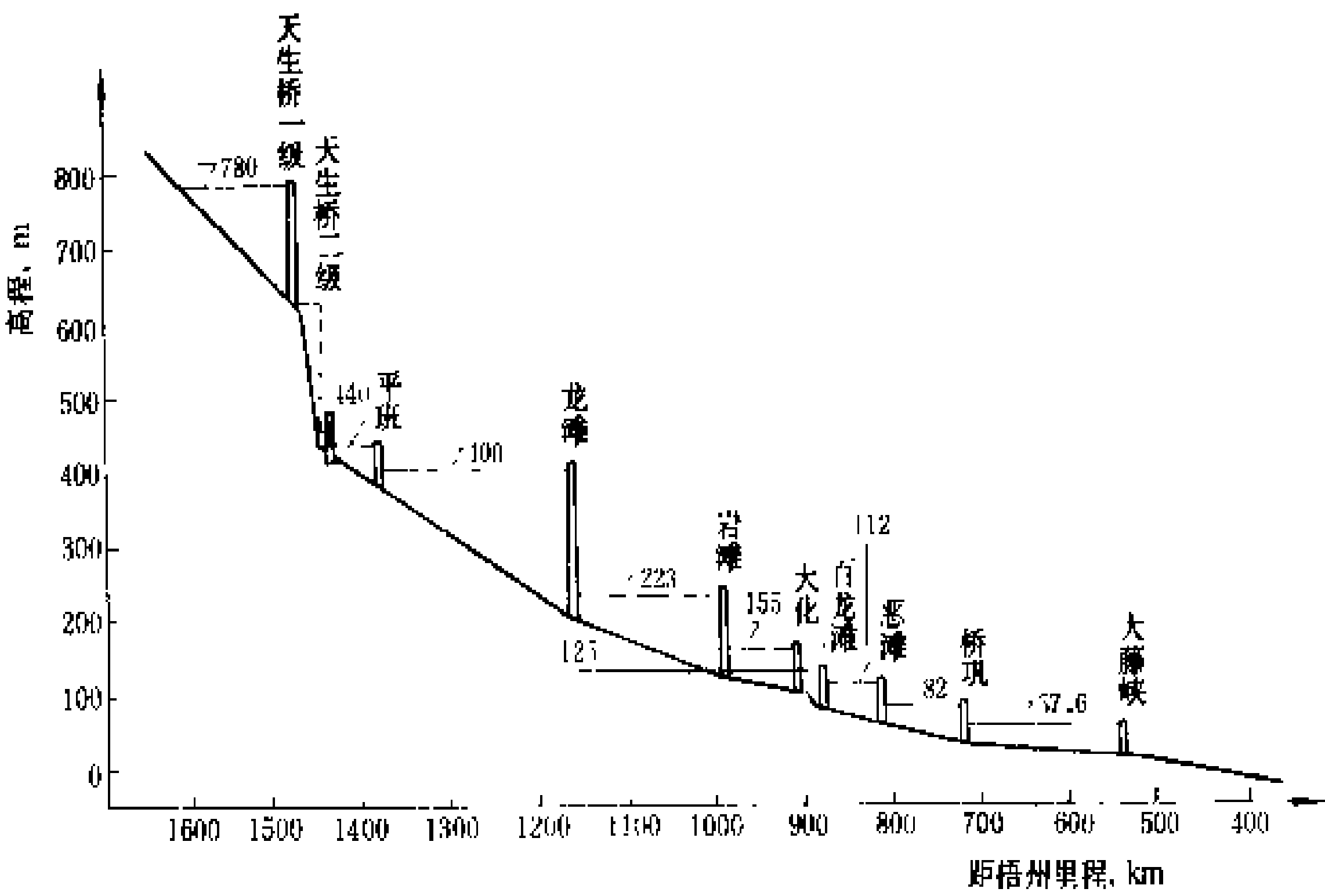
利用水头 180.3 m，年发电量为 17.57 亿 kW·h。松花江段河长 896 km，水面落差 78.4 m，具有理论蕴藏量 129.2 亿 kW·h/a。但因两岸多城镇和耕地，水能资源也不易利用。仅可能建水电站 1 座，装机容量 176 MW，年发电量 6.14 亿 kW·h。

第二松花江是松花江的最大支流，水能资源开发利用条件最好。干流河长 803 km，水面落差 1556 m，具有理论蕴藏量 70.3 亿 kW·h/a。可能开发水电站可装机 2943 MW，利用水头 614 m，年发电量为 57.8 亿 kW·h。其中已开发利用水电站的装机容量为 2254 MW，年发电量为 44.3 亿 kW·h。

(曹学敏)

Hongshui He shuidian guihua

红水河水电规划 (hydropower development planning of Hongshui river) 据 1989 年由水利水电规划设计总院编制的《十二大水电基地》，在南盘江下游，红水河及黔江布置有天生桥一级和二级、平班、龙滩、岩滩、大化、百龙滩、恶滩、桥巩、大藤峡共 10 级水电站。梯级水电站共利用水头 754 m，总库容 406 亿 m³，共装机 1252 万 kW，平均年发电量 504 亿 kW·h。梯级布置见图。1980 年广西壮族自治区完成了《红水河综合利用规划报告》，并经国务院批准。该报告确定先建岩滩水电站并初定了天生桥一级和龙滩水电站的规模。



红水河梯级水电站布置图

红水河是珠江流域西江干流中一个局部河段的名称，上自南盘江和北盘江的汇合口起，下到支流柳江汇入口止。从柳江汇入口到支流郁江汇入口止的西江干流段又称黔江。为使河段规划保持有一定的完整性，70 年代编写的红水河规划研究范围超出了红水河河

段，上游延伸到南盘江的下游河段，下游包括了全部黔江河段。

红水河开发以发电为主，兼顾防洪、航运、灌溉、水产等。红水河梯级水电站是中国水电开发基地之一。特点是：距中国经济发达的沿海地区近，水量充沛且调节性能好，地形地质条件优越，水库淹没损失相对少。随着广东、广西、贵州等省（自治区）的经济发展，其水能资源正在大力开发利用。防洪的主要对象是其下游浔江，西江干流两岸及珠江三角洲。规划在龙滩及大藤峡两电站水库设置防洪库容，并与河道两岸的防洪堤防配合运行以减轻洪灾损失。梯级水电站全部建成后，水库淹没河道的浅滩，增大枯水期流量，配以适当航道整治，可使全河通航，为贵州、广西开辟出海通道，有利于地区经济发展。10 座梯级水电站中，位于上游的天生桥一级和龙滩水电站的库容最大，可实施多年调节，不仅可提高本梯级 10 座电站的供电质量，还可对电力系统内其他水电站进行补偿调节（见水库群补偿径流调节）。从防洪角度看，以大藤峡电站水库距防洪对象最近，调节洪水的效果最好。由于大藤峡库容较小，龙滩水库还要承担防洪任务。所以天生桥一级、龙滩和大藤峡水电站是梯级的骨干工程。

随着地区经济发展，红水河梯级正在大力开发。10 座水电站中已开发的有大化水电站和恶滩水电站（恶滩水电站的正常蓄水位低于规划规模，有待提高）。正在建设的有天生桥一级水电站、天生桥二级水电站。岩

滩水电站（已于 1993 年开始发电）。已完成设计并列入开发议事日程的有龙滩和百龙滩水电站。大藤峡水电站的设计工作正在进行。

龙滩水电站控制流域面积 9.85 万 km²，多年平均流量 1590 m³/s，坝址处岩性为砂页岩，覆盖层仅 6 m。龙滩水电站有巨大的蓄能、调节和补偿作用，是骨干工程，综合利用效益显著。在可行性研究阶段选定的正常蓄水位为 400 m，在初步设计中审定为：按 400 m 设计，375 m 建设。装机容量为 5100 MW。

(欧阳华)

hongshui

洪水 (floods) 河流中流量迅猛增加、水位急剧上涨的现象，也称汛。洪水泛滥给两岸居民带来生

命财产损失,自古就引起人们重视。在中国有关洪水的最早文字记述见于《尚书·尧典》,记载了公元前 2297 年的一次洪水。

洪水能给人类带来灾难,但又是河流水资源的主要组成部分。在中国的河川径流多年平均值中,洪水水量所占比重达 50%~60%。因此,使洪水转变为可利用水资源是治水的主要任务。修建水利水电工程时,必须考虑建筑物可能承受洪水破坏的风险,按工程的重要性及失事后对下游的影响,采用不同标准的设计洪水,妥善处理安全与经济的统一。人类在长期与洪水灾害进行斗争中,不断揭示与洪水形成有关的因素及其变化规律,不断改进并完善各种途径的洪水预估及预报的理论、方法和各类数学模型和水文模拟。但由于影响洪水变化的因素(如天气系统、暴雨中心位置及走向、流域形态、地表植被等)的复杂性,对洪水的认识仍待逐步深入。

一次洪水过程可用洪峰流量、时段洪量及洪水过程线 3 个要素描述,同时也可据此比较各河流洪水的量级和特性。19 世纪以来,中国主要江河都曾发生特大洪水。如 1939,1963 年海河大水;1843,1933,1958 年黄河大水;1931,1975 年淮河大水;1870,1931,1954 年长江大水;1915,1949 年珠江大水。其中长江、黄河、珠江几次大洪水的量级及特性见表。

长江、黄河、珠江大洪水特征值表

河名	站名	集水面积 (km ²)	洪峰流量 (m ³ /s)	时段洪量		发生 年份	备注
				洪量 (亿 m ³)	历时 (d)		
长江	宜昌	1005501	105000			1870	调查
	汉口	1488036	76100	3220	60	1954	实测
黄河	陕县	687869	22000	108	15	1933	实测
	陕县	687869	36000			1843	调查
	花园口	730036	22300	101	15	1958	实测
珠江	武宣	196255	45600	606	30	1949	实测
	梧州	329705	54500	856	30	1915	实测

洪水的成因有:①流域内冰雪融化或降暴雨,地表径流突然增加,集中汇入河道形成洪水;②河流入海口段受暴潮顶托,上游来水宣泄不及,导致水位猛涨;③有的河流冬季冰封,春季开河淌凌,凌坝于下游卡口堵塞,形成冰坝,阻塞水流,造成水位迅猛抬升;④因地震或其他原因发生岩崩滑坡,阻塞河流,使水位不断抬高,当阻塞体漫溢溃决,对下游形成突发性洪水,这种情况,有时也发生于人工挡水建筑物的失事。4 种成因中,前 3 种成因是主要的、经常的,形成融雪洪水、暴雨洪水、冰川洪水和暴潮洪水。

融雪洪水 由流域中冬季积雪于春暖期融化进入河中,形成洪水,也称春汛。在北半球高纬度地区,如

北欧、苏联北部、加拿大等地河流以春汛为主要洪水。春汛特点是洪水总量大,涨落相对较缓,洪水历时较长。中国北方河流在春季因流域内积雪及结冰融化,引起河流涨水,俗称桃花汛,其洪峰流量均小于夏秋汛。黄河及一些北方河流冬季封冻,春暖时开河流凌,有时上游先开河而下游尚结冰,流动冰块在下游堵塞堆积,形成冰坝,水流受阻,造成水位猛涨,称为凌汛。

暴雨洪水 多发生于中低纬度地区,如中国、日本、印度、美国、巴西等地。暴雨洪水过程特征、峰量大小主要决定于:①暴雨不同历时强度;②暴雨中心位置及其移动方向;③暴雨面分布和时程分布;④产流、汇流条件等。

中国暴雨洪水发生时间因不同地区而异,福建、湖南等省各河流常始于 4 月;珠江流域的北江和东江则出现于 5~6 月,西江 6~7 月;淮河、黄河中下游及海河一般出现于 7~8 月;松花江干流出现于 8~9 月;黄河上游及汉江则到 10 月仍有洪水发生。暴雨洪水是我国河流上的主要洪水,年际变化很大,造成灾害最严重。中国境内的暴雨洪水主要类型有:①受大尺度大气环流条件和西太平洋副热带高压位置的相互作用在大陆上空形成大范围静止锋面,再受中间尺度的扰动而在较大范围内持续降雨,降雨范围可达数十万 km²,历时可达数十日。这种降雨会在较大流域上形成洪水,其

特点是洪水涨落较缓,洪水历时长,洪量较大,且往往和平原区内涝同时发生,加重灾害,如长江 1931 年、1954 年洪水。②因气旋性热带风暴及台风,以及大陆强低涡形成的洪水,是亚洲东南沿海及中国东部大洪水的主要形式。因低压中心携带大量水汽,降雨强度大,形成的洪水峰、量均较大。有时暴雨中心在移动过程中遇系统阻滞,在局地停留或回旋,造成大洪水,对防洪安全威胁很大,如淮河 1975 年 8 月大洪水。③由局部强对流云团形成强暴雨,雨区不大,历时短,强度很大,往往在小流域上形成大洪水,其特点是洪水陡涨陡落,历时很短,洪水过程尖瘦,在局部可造成严重损失。在山区,这类洪水又称山洪或骤发洪水,且常伴有泥石流。

冰川洪水 有冰川和永久积雪的高山区在夏季冰川和积雪融化,河中流量迅速增加而形成洪水。冰川洪水的特征是随日温而变化,常具有一日一峰的特点。在中国天山、昆仑山、祁连山和喜马拉雅山区都有发生。有时夏季因温暖雨降在冰川或积雪上而造成混合型洪水。

暴潮洪水 在河口处发生高潮,同时河流来水也较大,高潮顶托河水而导致水位猛涨。这类洪水对处在河口处的城市影响较大。中国的上海和英国的伦敦都

hong 洪

受到暴潮洪水的威胁。

参考书目

陶诗言等著，中国之暴雨，北京：科学出版社，1980
胡明思，骆承政主编，中国历史大洪水，上卷，北京：中国书店，1989

(陈家琦)

hongshui diaocha

洪水调查 (flood investigation) 对历史上出现过的和近期发生的大洪水进行调查和估算。目的是弥补实测水文资料的不足，以便合理可靠地确定水利水电工程的设计洪水数据。例如长江流域中游河段 1870 年、1935 年洪水，黄河中游 1843 年、1933 年洪水均经过多次反复调查论证，确定了数值和重现期，对这些地区和河段上已建和正在设计的大型水库水电工程设计洪水的确定起到了重要作用。洪水调查可分为现场调查、历史文献考证、洪峰流量和各时段洪量的估算。

现场调查 调查的内容一般包括洪水发生时间、洪水痕迹、洪水成因、洪水来源、当时河道和断面情况，施测洪痕高程、洪水水面比降、河段纵断面及河道简易地形等。洪水发生时间是确定洪水重现期的重要依据。除洪痕处有日期刻记者外，可结合对群众生活影响较大的事件和文献记载查访确定。洪痕调查是对人工刻记及所遗留的水迹、泥印等一切能够代表最高洪水位所达位置标志的调查和高程测量。洪水过程调查是确定洪量和峰型基本资料，可通过对群众当时受洪水威胁情况所定洪水涨、落所达位置和相应时间的调查来推估。洪水成因调查是确定洪水类别。有的大洪水是由于地震造成山崩堵塞河道而后溃决或上游水库失事溃决造成的，北方河流有因冰坝、冰塞壅高水位或溃决形成洪水，这些均要和暴雨洪水或融雪洪水区分开。河道和断面情况调查是在洪水流量估算中确定过水面积、比降、糙率等水力因素的依据，对于多沙和断面冲淤变化较大的河流尤为重要。

历史文献考证 我国史籍、文献、碑文、档案中，有丰富的洪涝记载，广泛收集，详细分析是洪水调查工作的重要内容。如根据北魏《水经注》记载，确定洛河龙门距今 1700 多年前（公元 223 年）发生一次 20800 m³/s 的特大洪水，对研究这一地区历史洪水量级、洪水重现期以及设计洪水计算起了重要作用。对于近年某些河流出现的特大洪水，如 1954 年长江、1958 年黄河、1963 年海河、1975 年淮河，均曾组织了详细调查，写出了专门报告。在 70 年代中期以来，各流域、省、市、区，均分区全面开展了洪水调查工作，并已汇编成册，

如已出版的《中国历史大洪水》等，均是中国宝贵的洪水调查文献资料。

洪峰流量和各时段洪量的估算 根据调查得到的洪痕点分布及调查河段的水力特性条件，选用适当的计算方法计算洪峰流量；根据调查或文献考证所得的洪水位涨落过程，通过该河段所建立的水位流量关系，推求出流量过程线，据此即可估算各时段的洪量。当调查河段内有水文测站时，利用该站已建立的水位流量关系和洪峰与各时段洪量关系，即可求得洪峰流量及相应的各时段洪量。

参考书目

水利电力部东北勘测设计院主编，洪水调查，北京：水利电力出版社，1977

(庄德楨)

hangshui tiaojie

洪水调节 (flood regulation) 为下游防洪及保证大坝安全，利用水库控制下泄流量，削减洪峰的径流调节，简称调洪。洪水调节的内容包括防洪标准的确定、调洪库容及其配置、防洪调度（即调洪运行决策）及洪水调节计算。

防洪标准 洪水调节是按照一定的防洪标准进行的，防洪标准是按洪水以年为单位的重现期来表达的。根据水电站大坝和主要建筑物及下游防护区等对象的重要性而应有不同的防洪标准。世界各国有各自不同的标准。中国 1977 年和 1978 年颁布的《水利水电工程水利动能设计规范》（试行）和《水利水电枢纽工程等级划分及设计标准》（试行）中所规定的标准见表 1。

调洪库容及其配置 调洪库容指水库为拦蓄洪水而充蓄的容积。调洪库容一般由两部分组成：①为下游防洪区调洪而设置的库容，也叫防洪库容。②为保坝而设置的库容。

调洪库容的配置有二种情况：①全部在正常蓄水位以上。②正常蓄水位以上和以下各设置一部分，正常蓄水位以下的调洪库容，又称为结合库容。

洪水调节一般应按入库洪水及静库容和动库容进行，但对动库容较小的水库，也可按坝址洪水及静库容调节。

洪水调度 为有效地利用库容调洪，且不致造成人为洪灾，按下述规则进行洪水调度：①当无洪水预报时，宜按防洪标准，由小到大逐级调节；当洪水流量大于某一标准的洪峰流量且库容达到该标准的最大库容时，才允许按大一级的洪水进行调节。②当有可靠的洪水预报时，可以在洪峰到来以前，预泄部分防洪库容，但要计及可能的预报误差，留有余地。③对于常出现历时较长的多峰型的河流，一个洪峰过后，应在不造成人

为洪灾的前提下，尽快腾空调洪库容。

图 1 是逐步洪水调节示意图。频率 $p=5\%$ 及 $p=1\%$ 是下游防洪标准； $p=0.1\%$ 及 $p=0.01\%$ 是保坝标准。图 1 (a) 表示对 $p=5\%$ 的洪水过程控制泄流量为 $q_{5\%}$ ，相应防洪库容为 $V_{5\%}$ 。图 1 (b) 表示对 $p=1\%$ 的洪水，先按 $p=5\%$ 的控制泄流量 $q_{5\%}$ 进行调洪，当水库蓄洪 $V_{5\%}$ 且洪水流量大于 $p=5\%$ 的洪峰流量时，按 $p=1\%$ 的控制泄流量 $q_{1\%}$ ，进行调洪总蓄洪量为 $V_{5\%} +$

$V_{1\%}$ 。图 1 (c)、(d) 分别表示，对于 $p=0.1\%$ 及 0.01% 的洪水，顺序按 $p=5\%$ 及 $p=1\%$ 的洪水进行调洪，当水库蓄洪量达到 $V_{5\%} + V_{1\%}$ ，洪水流量大于 $p=1\%$ 的洪峰流量时，闸门全开进行敞泄，按 $p=0.1\%$ 及 $p=0.01\%$ 保坝调洪，水库分别蓄洪 $V_{5\%} + V_{1\%} + V_{0.1\%}$ 及 $V_{5\%} + V_{1\%} + V_{0.01\%}$ ，即为相应的千年一遇及万年一遇洪水调洪库容。对于各频率的调洪过程均应进行相应的调洪计算。

表 1 水电站工程及下游城镇、农田防洪标准

水电站工程				为下游防洪				
工程等级	工程规模	水库总容量* (亿 m ³)	水电站装机容量 (万 kW)	防洪标准重现期(年)		保护对象		防洪对象重现期 (年)
				正常运用	非常运用**	保护城镇	保护农田面积 (万亩)	
一	大(1)型	>10	>75	2000~500	10000(或可能最大洪水)~5000	特别重要城市	≥500	≥100
二	大(2)型	10~1	75~25	500~100	2000~1000	重要城市	100~500	50~100
三	中型	1~0.1	25~2.5	100~50	1000~500	中等城市	30~100	20~50
四	小(1)型	0.1~0.01	2.5~0.05	50~30	500~300	一般城镇	≤30	10~20
五	小(2)型	0.01~0.001	<0.05	30~20	300~200			

* 总库容系指校核洪水位以下的水库静库容。

** 大值适用于土坝、堆石坝，小值适用于混凝土坝、浆砌石坝。

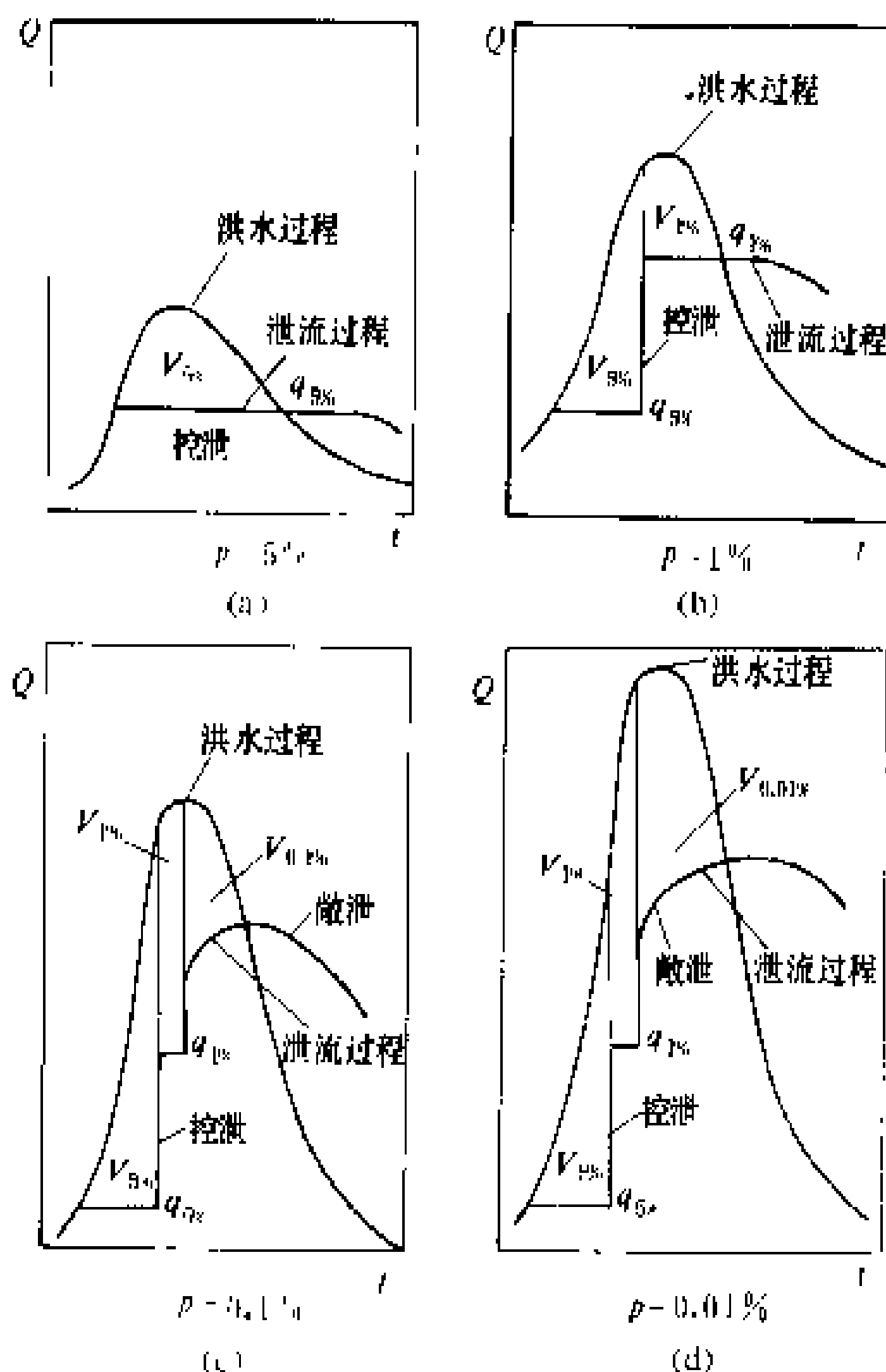


图 1 逐级洪水调节示意图

(a) $p=5\%$; (b) $p=1\%$; (c) $p=0.1\%$; (d) $p=0.01\%$

洪水调节计算 包括计算原理、计算方法、敞泄的调洪计算、梯级水库洪水调节、错峰洪水调节等。

计算原理 洪水调节计算是非恒定流计算，要求

解圣维南 (De Saint Venant) 方程组，即

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial S} = 0 \quad (1)$$

$$i_0 - \frac{\partial h}{\partial S} = \frac{v^2}{c^2 R} + \frac{1}{g} \times \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{g} \times v \frac{\partial v}{\partial S} \quad (2)$$

式中 W 为断面面积， m^2 ； Q 为流量， m^3/s ； t 为时间， s ； i_0 为河底比降； v 为断面流速， m/s ； h 为平均水深， m ； S 为距离， m ； c 为谢才系数。

可采用瞬态法或特性线法近似求解。

在工程设计中，一般假定水库水位与容积在单位计算时段内成直线变化，故可改为解下列方程式

$$\frac{(Q_1 + Q_2)}{2} \Delta t - \frac{(q_1 + q_2)}{2} \Delta t = V_2 - V_1 \quad (3)$$

上式即为按坝址洪水及静库容，求解一个时段调洪的水量平衡方程。式中下角标 1、2 分别表示调节时段初、末； Q 、 q 分别为时段洪水流量及泄流量， m^3/s ； V 为水库容积， $(m^3/s) \Delta t$ ； Δt 为调洪单位时段长， h 。

计算方法 根据洪水调节的规则，将式 (3) 与水库容积与泄流能力关系曲线式 (4) 联立求解

$$q = f(V) \quad (4)$$

所需资料为：①与各种防洪标准相应的洪水过程；②水库容积与泄流能力关系曲线。

求解步骤：①起调库容为与正常蓄水位(或汛期限

hōng 洪

制水位,如果有的话)相应的库容。②根据洪水调度规则确定泄流量 q_2 。③按库容求泄流能力,若泄流能力大于或等于 q_2 ,且 $Q_2 \geq q_2$ 则控制泄量调节,即 q_2 已知,可按式(3)求得 V_2 。④若泄流能力小于 q_2 ,则闸门全开按泄流能力泄洪,叫保坝敞泄。⑤当每一个防洪标准的调洪结束时,可得到该标准的调洪最大库容,作为大一级防洪标准加大泄流量的依据。

敞泄的调洪计算 敞泄调洪计算有数值法和半图解法。

(1)数值法。一般采用试算法,即先假定 q_2 值,用式(3)解 V_2 值;再以 V_2 值用式(4)求泄量 q'_2 ,若 q_2 与 q'_2 充分接近,则该时段算毕,否则需重新假定 q_2 值,继续迭代计算,是计算机常用的方法。

(2)半图解法。步骤如下:
首先,制作工作曲线。将水量平衡方程改变为
$$\bar{Q} - q_1 + \left(\frac{V_1}{\Delta t} + \frac{q_1}{2} \right) = \left(\frac{V_2}{\Delta t} + \frac{q_2}{2} \right) \quad (5)$$

式中 \bar{Q} 为调洪单位时段内已知入库流量的平均值, m^3/s ;其他符号意义同式(3)。

工作曲线即 q 与 $\left(\frac{V}{\Delta t} + \frac{q}{2} \right)$ 的关系曲线,可根据式(4)按表2计算。

表2 水库调洪计算工作曲线表

库容 V (m^3)	出流 q (m^3/s)	$V/\Delta t$ (m^3/s)	$q/2$ (m^3/s)	$V/\Delta t + q/2$ (m^3/s)	备注
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

假定几个水库容积填入第(1)列;水库的泄流能力填入第(2)列;将 V 除以 Δt 化为 m^3/s 填入第(3)列;第(3)、(4)列之和为第(5)列。据表中第(2)列 q 与第(5)列 $(V/\Delta t + q/2)$ 点绘关系即得水库调洪计算工作曲线,如图2。

其次,计算。因式(5)左边均为已知,故可求得式(5)右边之值。由此,在 $q \sim (V/\Delta t + q/2)$ 曲线上查得 q_2 ;再将 q_2 作为下一计算时段的 q_1 代入式(4)左边,求式(4)右边之值,在工作曲线上查 q_2 。

梯级水库洪水调节 梯级水库洪水调节是按自上而下逐级调节,下一级的洪水过程,是按上一级的泄流过程进行洪水演进计算,到达下游梯级并与区间洪水汇合而成。洪水演进计算广泛应用马斯京干法。

错峰洪水调节 水库调洪考虑与下游区间洪峰错开,使水库泄流量到达下游防洪区与区间洪水遭遇后,不大于按标准的安全泄量,又叫做补偿洪水调节。这种调洪,水库的泄流量决定于错峰的需要。错峰洪水调节,也需进行洪水演进计算,且需应用试算法求得满足防洪要求的水库泄流过程。

参考书目

华东水利学院叶秉如主编.水利计算.北京:水利电力出版社,1985

(许自达 伍宏中)

hōngshuǐ yǎnjìn

洪水演进 (flood routing) 研究洪水波沿河道传播演变的计算方法。目的是根据上游干支流出现的洪水过程及区间来水,预报下游某断面的洪峰流量、出现时间、最高水位及洪水过程,为下游洪水预报及防洪提供依据。洪水波传播属河道不恒定流,其演变规律符合圣维南方程组。洪水演进分水文学方法与水力学方法两类。

水文学方法 用河段水量平衡方程和槽蓄方程分别代替圣维南方程组中的连续方程和动量方程

$$I - O = \frac{dW}{dt} \quad (1)$$

$$W = f(I, O) \quad (2)$$

式中 I, O, W 分别为河段入流、出流和槽蓄量; t 为时间。联解(1)式和(2)式可求得洪水演进方程。水文学方法简单直观,其成果精度取决于实测资料的可靠性与完整性。此类方法很多,比较常用的方法有马斯京根法(Muskingum Method)与经验槽蓄曲线法等。

(1)马斯京根法。其基本方程为

$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1 \quad (3)$$

其中系数

$$C_0 = \frac{0.5\Delta t - Kx}{0.5\Delta t + K(1-x)}$$
$$C_1 = \frac{0.5\Delta t + Kx}{0.5\Delta t + K(1-x)}$$
$$C_2 = \frac{K(1-x) - 0.5\Delta t}{0.5\Delta t + K(1-x)}$$

式中 O_1, O_2 为出流断面时段初及时段末流量; I_1, I_2 为入流断面时段初及时段末流量; Δt 为时段长; K 为蓄量常数,具有时间因次; x 表示在求槽蓄量时入流量与出流量的相对权重; K, x 值可由实测地形和水文资料确定。已知入流过程及起始出流量,可按式(3)求得出流过程。本法成果精度能满足工程设计及洪水预报要求,实际应用较广。

(2)经验槽蓄曲线法。根据河段实测入流和出流及槽蓄量资料,建立关系(经验槽蓄曲线),已知入流

过程,经与水量平衡方程联立求解,即可求得出流过程线。

水力学方法 将圣维南方程组变为差分方程组用数值方法求解

连续方程 $\frac{\partial Q}{\partial S} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$ (4)

动量方程 $i - \frac{\partial h}{\partial S} = \frac{1}{g} \times \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \times \frac{\partial V}{\partial S} + \frac{V^2}{C^2 R}$ (5)

式中, Q 为流量, m^3/s ; A 为过水面积, m^2 ; q 为区间单位长度入流量, $m^3/(s \cdot m)$; V 为断面平均流速, m/s ; h 为水深, m ; i 为比降; C 为谢才系数; R 为水力半径, m ; g 为重力加速度; t 为时间; S 为距离, m 。

20 世纪 50 年代以前有特征线法及瞬态法。由于计算机的广泛应用,发展了特征差分和直接差分等数值计算方法。直接差分法又分为隐式差分法与显式差分法两种(见明渠不恒定流)。水力学方法理论比较严密,对基本资料要求较高,成果比较系统全面,在工程设计中日益广泛使用。差分法需要河道纵横断面资料、糙率资料及计算初始时沿程各断面的流量和水位资料,上边界条件为干支流洪水过程线,下边界条件一般为控制断面的水位流量关系曲线。

(唐友一)

hongshui yubao

洪水预报 (flood forecasting) 根据洪水成因及其特性规律,利用前期或现时出现的水文气象要素,对未来一定时段内的洪水状况的预测。预报内容包括最大洪峰流量及其出现时间、洪水涨落过程、洪水总量等。在河道、水库防汛工作中,洪水预报是一项重要的非工程防洪措施。对 1958 年黄河下游,1963 年海河及 1981 年长江和黄河上游等大洪水的预报,为制定防洪措施,减轻洪水灾害起到了显著作用。编制预报方案所引用的水文资料,要有足够的代表性,一般不应少于 10 年系列,并需包括大水年、平水年和小水年。编制预报方案所采用的预报方法,必须有理论根据。预报方案建立后,需进行评定、检验,以说明方案的有效性和可靠程度。

按服务对象不同洪水预报可分为天然河道洪水预报和水库工程施工期及运行期洪水预报。

天然河道洪水预报 利用河道中洪水波运动规律,根据河道上游的某断面的水位流量,通过上下游的水位(流量)相关或洪水演进方法,预报一定时段后下游某指定断面的洪水位或流量及其出现的时刻。也可根据流域内发生的暴雨,通过暴雨径流关系、流域模

型、单位线等产汇流分析计算方法预报洪水。

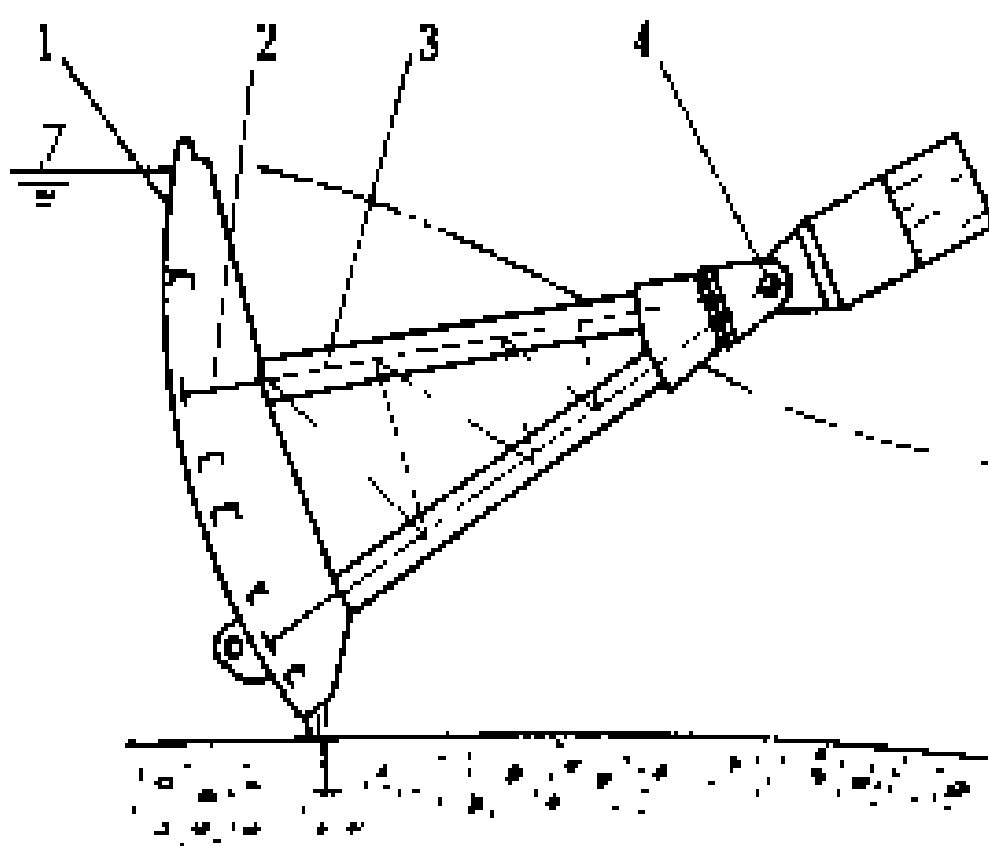
水库工程施工期洪水预报 施工围堰导流期间,要求预报上游来水量和围堰前的水位。由于工程导流标准一般都比较低,不仅要作好大洪水预报,而且对中小洪水的预报也很重要,特别是在基坑开挖、浇筑混凝土期间,要根据预报洪水的大小判断基坑是否过水,作出继续施工还是组织撤退的决策。在整个施工期间,对沿河料场、生活区也要及时作出洪水预报,以利防汛。工程截流期要预报龙口上下游水位、龙口流速。截流后在边施工边蓄水的情况下,要预报入库洪水和库水位。预报方法与天然河道洪水预报基本相同,但要考虑围堰束窄河道壅高上游水位的因素。

水库运行期洪水预报 水库建成后,运行期内主要预报入库流量、水库最高水位及其出现时刻。对有防洪任务的水库,据此进行洪水调度。预报方法与天然河道洪水预报基本相同,但在预报水库水位及泄量时要进行水库调蓄演算。

(夏方佐)

huxing zhamen

弧形闸门 (Tainter gate) 面板呈弧形,环绕支铰旋转,以启闭孔口的闸门。由弧形面板、梁系及支臂等构成的一空间结构,见图所示。支铰一般位于泄流水面线以上,支铰轴线(即闸门的旋转中心线)与弧形面板的圆心轴线相重合,作用在闸门弧面上的总水压力通过支铰轴线。由于旋转半径的缘故,这种闸门在启闭时所需的启吊力较同尺寸的平面闸门为小。弧形闸门泄流时水流比较符合自由出流的流态,闸墩侧面无门槽的干扰,水流条件较好。因此,弧形闸门广泛用于水利水电和水运工程上,多作为泄水孔口的工作闸门。



弧形闸门示意图

1 弧形面板; 2—梁系; 3—支臂; 4 支铰

随着水利水电工程建设的发展,泄水建筑物上选用弧形闸门的尺寸规模和技术指标日益增加。溢洪道露顶式弧形闸门的挡水面积达 300~400 m^2 左右;宽度达 15~20 m,高度达 20 m 以上。总水压力达 40000



~50000 kN。深孔弧形闸门的挡水面积在 30~80 m² 左右，设计水头已提高到 80~120 m，总水压力达 60000~80000 kN。

弧形闸门的面板一般设在上游承压侧。用于船闸输水廊道中的反向弧形闸门，其面板则设在下游面，以减免充水时门井水面波动和水流挟气等影响。弧形闸门梁系结构的连接有同层和叠层等方式。其主梁布置有主横梁式和主纵梁式两种。主横梁式多用于宽扁型孔口，而主纵梁式多用于高窄型孔口。弧形面板和次、主梁梁系所形成的门叶结构由两根或两根以上支臂所支撑。为了受力明确、整体刚度大和制造安装方便，通常选用两支臂。但如孔口较高，也可用三支臂或多支臂。支臂在门叶两侧的支承形式有直支和斜支两种，前者适用于宽度小的孔口，后者则多用于宽度大的开敞式孔口。支铰有圆柱铰、球铰、双圆柱铰、圆锥铰和关节轴承铰等形式。圆柱铰结构简单，自重轻，造价低，适用于直、斜支臂的多数结构情况。当斜支臂式弧门的支铰承受较大侧推力时，可采用圆锥铰。球铰或关节轴承铰等对闸门受载荷后的变位和支臂的安装误差，都具有较大的适应性，但其构造较复杂。

(沈德民)

hudie fa

蝴蝶阀 (butterfly valve) 装在水轮机前引水钢管上，活门扁平呈蝶形的阀门。开关时绕中心轴回转。仅在水轮机组事故、导水叶严重漏水和机组检修时关闭，正常运行和其他状态均处于全开位置。全开时活门处在水流中，水力损失较大，但外形尺寸小，结构简单，重量轻。一般用于 250 m 以下的水头。委内瑞拉的塔瓜扎 (Taguaza) 电站已用到 640 m。蝴蝶阀主要由阀壳、活门、阀轴、密封装置、操作机构及附属设备组成。

阀轴布置型式 分立轴和卧轴两种。立轴蝴蝶阀，见图 1 (a)。阀壳分半面在水平位置，操作机构设在阀的上部，便于运行维护，占地面积较小。下部为止推轴承，常由于沉积泥沙引起磨损，发生活门下沉影响密封性能。卧轴蝴蝶阀，见图 1 (b)。阀壳分半面在垂直位置，不需止推轴承，无积沙问题，结构简单，成本低，使用较多。

阀壳 除低水头小直径的阀壳用铸铁铸造外，一般均用铸钢或钢板焊接，并根据制造、运输、安装条件决定是否分瓣。阀壳基础只承受活门重量及操作力，全关时的轴向水推力由连接钢管承受，因而阀壳应允许有少量的水平移动。在阀壳的轴承处加装圆弧型导流板，可减少水力损失。

活门 有菱形、铁饼形和双平板形三种，见图 2。

大直径活门一般做成菱形或铁饼形，均为中空结构，可采用铸铁、铸钢或经焊接而成。活门根据运输条件由两

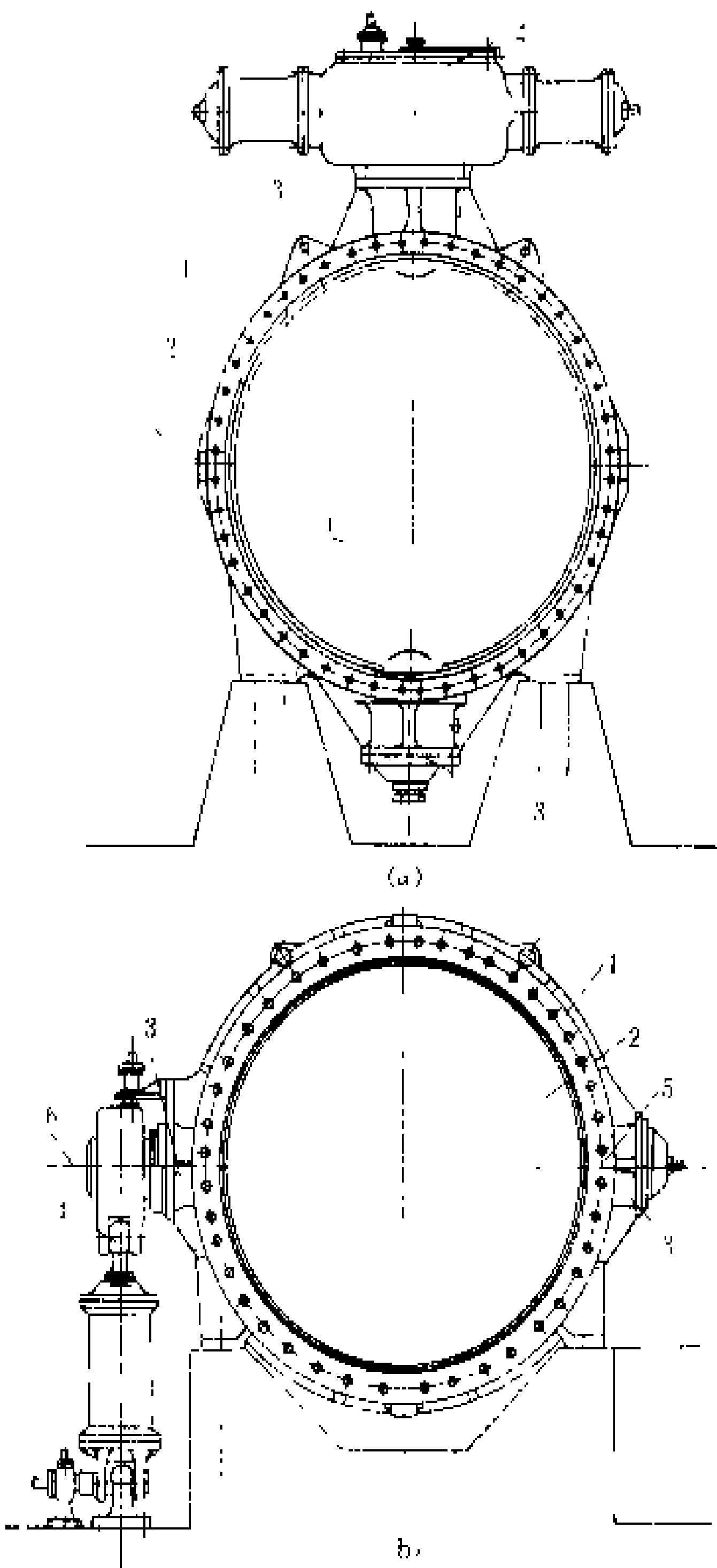


图 1 阀轴布置型式

(a) 立轴蝴蝶阀；(b) 卧轴蝴蝶阀
1—阀壳；2—活门；3—轴承；4 操作机构；5 分半面；
6 阀轴线

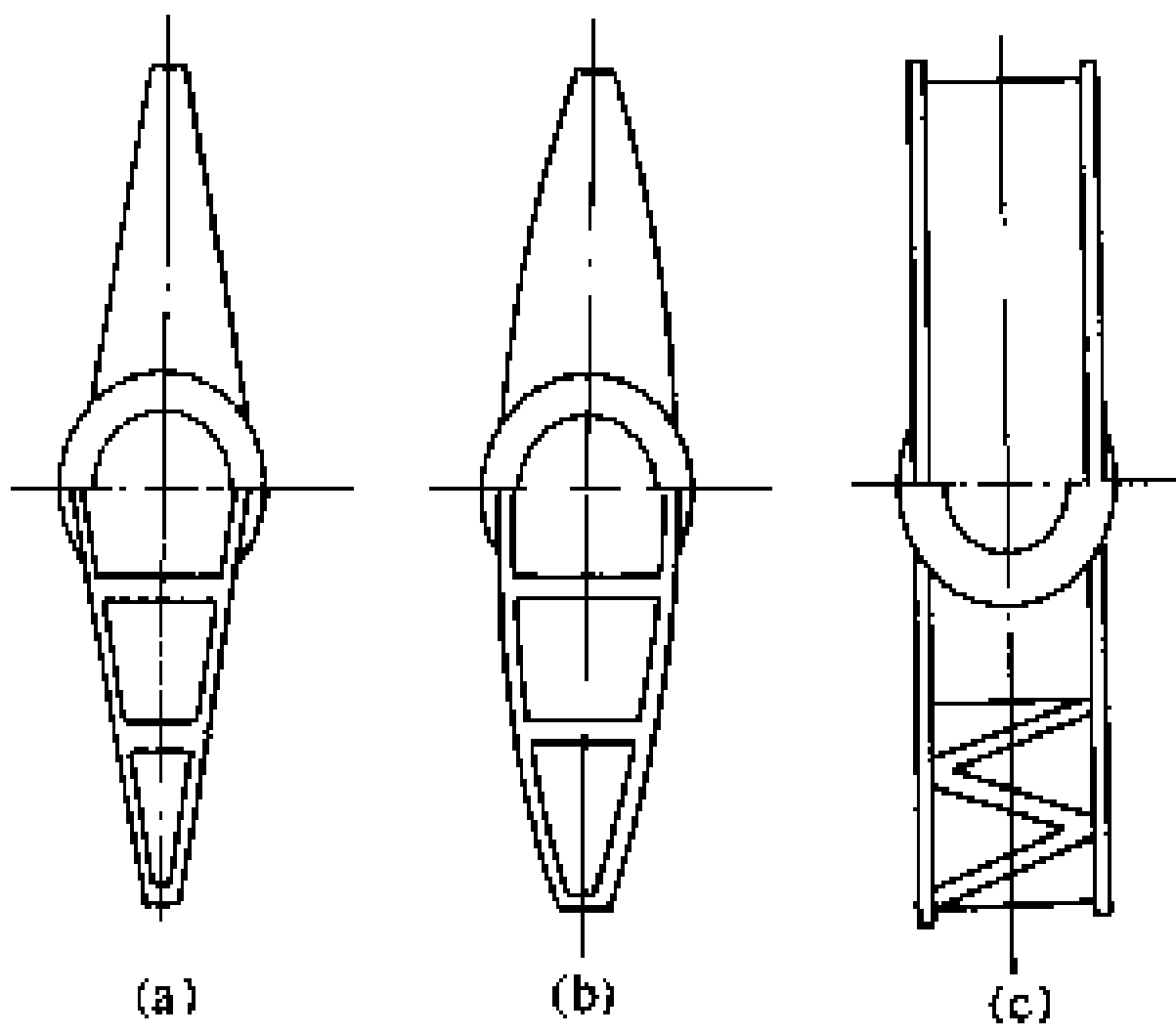


图 2 菱形、铁饼形及双平板形活门

(a) 菱形；(b) 铁饼形；(c) 双平板形



瓣或三瓣组成。双平板形活门两侧各有一块圆形平板，由若干沿水流方向的筋板连接，全开时筋板间也过水，因此水力损失小，全关时密封面不通过阀轴，因而漏水大为减少。双平板形活门应用很广，但其结构不便分瓣，受运输条件限制直径不能做得很大。

阀轴 对于直径较小，水头不高的整体活门，可用贯穿活门的整体阀轴；对于水头较高，或直径较大的分瓣活门，可采用与活门中段做成一体的阀轴或用螺钉固定在活门上的两段装配阀轴。阀轴轴承一般采用铸锡青铜轴瓦，压装在钢套上，用螺栓和阀壳固定，黄油润滑。

密封装置 活门的外圆密封有两种，充气式橡胶围带密封用于转 90°的活门上，密封气压大于水压 0.2~0.4 MPa，见图 3 (a)。青铜板或硬橡胶板和不锈钢组成的密封用于转 80°~85°的活门，靠关闭的操作力将活门压紧在阀壳上止水，见图 3 (b)、(c)。对于菱形和铁饼形活门和阀轴连接处设有端部密封，一般用涨圈式或橡胶围带式密封。有的蝴蝶阀具有工作和检修两套密封，检修密封用水压操作，投入后可更换橡胶工作密封。

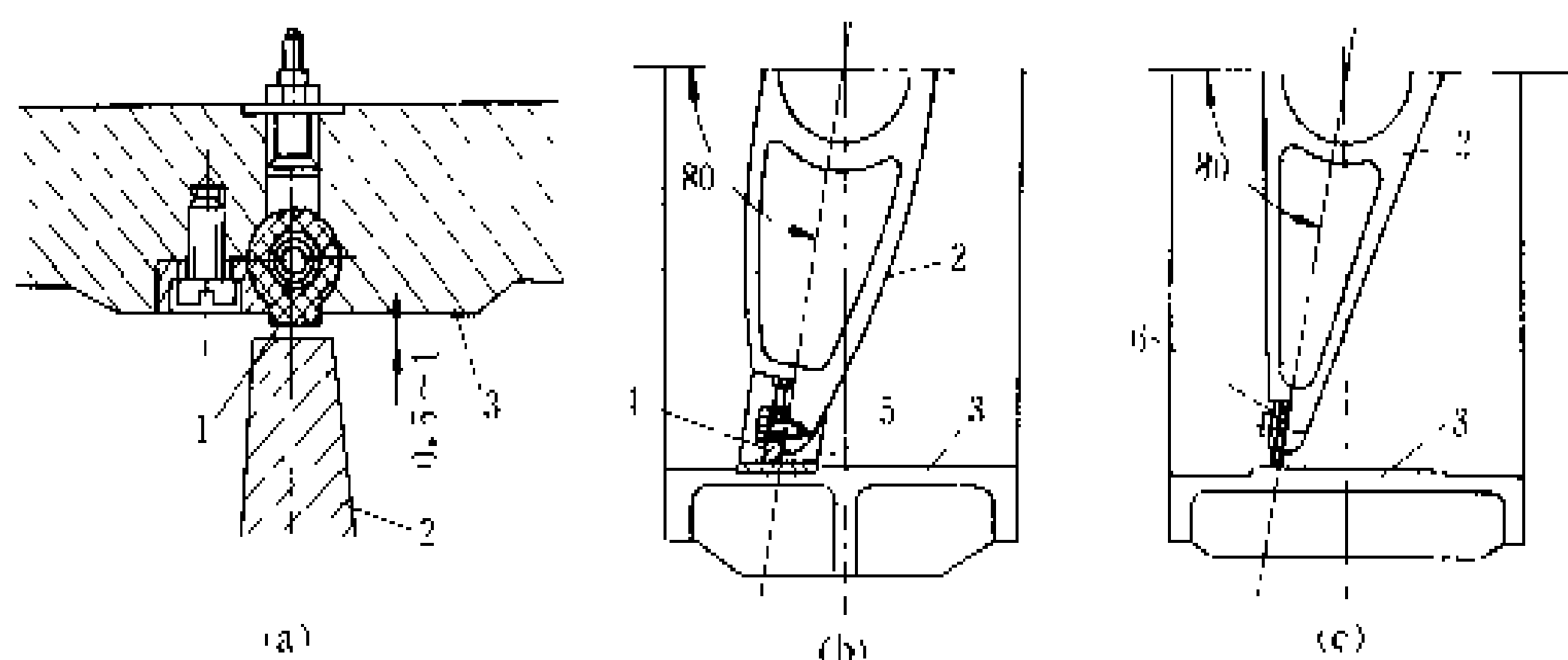


图3 活门的外圆密封

(a) 充气式橡胶围带密封；(b) 青铜板密封；(c) 硬橡胶板密封

1—空气围带；2—活门；3—阀体；4—青铜板封水环；5—不锈钢衬；6—橡胶封水环

操作机构 水头不高的中小型蝴蝶阀用手动或电动操作，大多数用油压或水压操作，为增加事故关闭的可靠性，卧轴蝴蝶阀可用重锤关闭。液压操作有环形接力器、导管接力器、刮板接力器、摇摆接力器几种，并有单缸和双缸之分。摇摆接力器结构简单、可靠，尺寸小，广泛应用于卧轴蝴蝶阀上。

附属设备 为在蝴蝶阀开启前向阀后钢管和蜗壳充水，使活门能在接近均压时开启，设置旁通阀，其直径一般取蝴蝶阀直径的 $\frac{1}{7} \sim \frac{1}{10}$ 。为防止活门意外动作，蝴蝶阀设有锁锭装置。为旁通阀充水时排气及蝴蝶阀紧急关闭时补气，设有空气阀，其直径一般为蝴蝶阀直径的 7%~10%。为便于蝴蝶阀的安装和拆卸，其下

游侧装有伸缩节。

(吴次光)

huapo

滑坡 (land slide) 斜坡上岩体或土体在重力作用下，沿贯通的剪切面发生块体滑动的现象。滑坡发生前往往有蠕动变形的迹象。滑坡是分布最广的边坡破坏形式，是山区常见的地质灾害。

滑坡形态特征 发育完全的典型滑坡，通常有以下的形态和结构特征：①滑坡体（滑体），是向下滑动的岩（土）体部分，表面起伏不平，裂隙纵横分布。在滑坡前缘如舌状向前伸出部分称滑坡舌，滑坡前缘因受挤压而隆起的部分称滑坡鼓丘，滑坡体上因各段滑动速度差异而形成的台坎称滑坡台坎。滑坡体上的裂隙有后缘的拉张裂隙、边缘的剪切裂隙、鼓丘部位的鼓张裂隙及滑坡舌部位的扇形张裂隙等。②滑动面和滑波床。滑动面简称滑面（带），系指滑坡体沿其滑动的面（带），大多由软弱的地质结构面所构成。滑动面以下稳定的岩（土）体称为滑波床，简称滑床。③滑坡壁，是滑坡体后缘滑面的出露部位，大多陡如壁状，在平面上多呈弧形的“圈椅状”。上述滑坡的形态和结构特征是鉴定滑坡的主要标志。

滑坡形成因素 有斜坡体的内部因素和外部因素两类。①内部因素包括组成斜坡岩土体的性质、地质构造、岩土体结构及斜坡地形等。由粘土、页岩、泥岩、泥质片岩等地层组成的斜坡往往容易形成滑坡。区域构造复杂、新构造活动地区，常出现巨型、大型滑坡及滑坡群。岩质边坡中的滑坡多沿顺坡向结构面滑动。高陡边坡坡脚处应力集中，易遭受剪切破坏而产生滑坡。

②外部因素包括水的作用，地震及人为因素等。大多数滑坡发生在雨季，表明水对岩土体的物理力学性质及斜坡附加荷载的改变起着特殊重要的作用。强烈地震引起的剧烈振动常促使滑坡的发生。水流冲蚀或开挖坡脚，或增加坡体上部荷载，往往破坏自然斜坡的稳定而引起滑坡。

滑坡分类 按力学特性可分为牵引式和推移式滑坡；按岩体结构特征，分为均质滑坡、顺层滑坡和切层滑坡；按滑坡体岩性组成特征，可分为堆积层滑坡、黄土滑坡、粘土滑坡与岩质滑坡；还可按滑动面埋深或滑体厚度，分为浅层滑坡、中层滑坡及深层滑坡。

滑坡防治措施 ①排水：拦截或旁引滑体外的地表水不使进入滑体，滑体表面防渗和疏排滑体内的地



下水,以消除或减轻水对滑坡的危害影响。②增强滑体的力学平衡条件:如上部削坡、在坡体下部堆土(石)压坡或修建支挡建筑物(挡土墙、抗滑桩等)、增加滑带抗滑力(预应力锚索、锚桩等)。③改善滑带土的性质:如采用灌浆、焙烧法或电化等方法加固滑带土,以增强其抗滑能力。

(邹小安)

huaxue guanjiao

化学灌浆 (chemical grouting) 灌注化学溶液的灌浆。对于使用固体颗粒浆液灌注难以成功或收效甚微的工程问题,例如:对断层和破碎带的处理;对砂层和岩石中小于 0.2 mm 微细裂隙的防渗处理;对混凝土微细裂缝的补强灌浆等,常采用化学灌浆。

化学灌浆的主要优点是:①溶液粘度低,可灌性和渗透性好。凡是水能灌入之处,化学溶液也可灌入;水难灌入的部位,化学溶液则可慢慢渗入。大大地提高了被处理部位的固结和防渗性能。②溶液和胶凝时间可以准确的控制,有利于施工,特别适用于灌注扬压力高或流速快的部位。③溶液聚合胶凝后,其渗透系数小,一般可达 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/s,防渗性能好。④溶液胶凝后,其与岩石或混凝土的粘结性好,也比较稳定。

常用的化学灌浆溶液有:①硅酸盐类;②木质素类;③高分子化学类,例如丙烯酰胺类、丙烯酸盐类、聚氨酯类、环氧树脂类、尿素类等。

化学灌浆方法有两种:①单液法,将溶液的各组分,在灌注前依照规定的比例和加入的顺序一次混合好,用泵压送到灌浆部位内。②双液法,将预先已配制成的两种溶液,分别装于各自的容器内,使用比例泵依照规定的比例送浆,使双液在灌浆部位附近的混合器中混合后压入,或者是将双液直接压入灌浆部位内,在该部位内混合。

常用的化学灌浆泵有:手摇压浆泵,各种型式比例泵,晶闸管调速的齿轮泵,隔膜计量泵等。

化学灌浆存在的主要问题有:①上述各类浆材除硅酸盐类外,或多或少都有一些毒性,易引起环境污染,对施工人员的身体健康也会有些小影响。②灌浆效果的耐久性问题,尚未能了解得十分清楚。③有些化学浆材价格贵,不宜大量使用。故在采用化学灌浆时,应对上述问题认真考虑,并应采取相应的有效措施。

(孙 钊)

Huai He shuixi shuineg ziyuan

淮河水系水能资源 (hydropower resources of Huaihe river system) 据 1980 年《中华人

民共和国水力资源普查成果》统计,淮河水系水能资源理论蕴藏量为 104.19 亿 kW·h/a,仅占中国的 0.18%;其中可能开发资源(见水能资源)16.18 亿 kW·h/a,占中国的 0.08%。

淮河水系流域面积 18.7 万 km²,发源于河南省桐柏县的桐柏山,流经河南省南部,安徽省北部及江苏省北部,在江苏省江都县三江营入长江,干流长 1078 km。淮河水系支流众多,水系分散,各支流源短流急,水能资源不多。干流洪河口以上河道坡降相对较大,水系水能资源主要分布于这个河段,但因径流量较少,可能开发的水电站的装机规模不大,最大单站装机容量仅为 4 万 kW,都属中小型。

(赵毓崑)

huanjing baohu sheji

环境保护设计 (design of environmental protection) 遵循有关环境保护法律、法规,不同设计阶段环境保护的设计工作。由于各国规定的基建程序不尽相同,因此,不同设计阶段环境保护设计的具体要求也有不同。一般可行性研究阶段主要做环境影响评价,其后阶段是落实评价报告中提出的对不利影响的减轻和消除措施,环保设计深度与工程设计深度相对应。

在中国,国家计划委员会和国务院环境保护委员会 1987 年 3 月颁发了《建设项目环境保护设计规定》,对建设项目各设计阶段提出了环境保护设计要求。

(1) 项目建议书阶段。根据水电站的特性、规模以及所在地区的环境现状等资料,对水电站建成投产后可能造成的环境影响进行简要说明。其主要内容①所在地区的环境现状;②可能造成的环境影响分析;③当地环境保护部门的意见和要求;④存在的问题等。

(2) 可行性研究阶段。对水电站进行环境影响评价,编制环境影响报告书。其主要内容①工程概况;②周围地区的环境状况;③对周围地区环境影响的分析和预测;④主要为减免不利影响所需采取的环境保护措施及费用估算;⑤环境监测规划;⑥环境影响经济效益简要分析;⑦评价结论;⑧存在的问题和建议。

(3) 初步设计阶段。具体落实环境影响报告书及有关审批意见所确定的各项环境保护措施。初步设计文件应有环境保护篇章。其主要内容包括①环境保护设计依据;②对环境的主要不利影响;③采用的环境保护标准;④对引起的生态变化拟采取的防范措施;⑤环境保护措施设计及其预期效果;⑥环境监测规划的实施方案;⑦环境保护投资概算;⑧存在的问题和建议。

(4) 技术设计阶段。按初步设计文件环境保护篇

章所确定的各种环境保护措施和要求,提出水电站环境保护措施的技术设计。

(沈淦生)

huanjing jiance

环境监测 (environmental monitoring)

水电站建设前、建设期和运行期环境状况的监测工作。水电站的环境监测任务视其工程特性及其可能造成的环境影响而定,在工程环境影响评价基础上提出。

监测站或采样点的布置、监测时段、监测分析项目、监测分析方法等要符合有关规定要求,要能反映水电站建设和运行期的环境质量情况,作为水电站合理运行的依据之一。

水电站建设前实测环境状况数据需作为水电站建设后环境状况变化对比的背景值。因此,环境监测应在水电站建设前就开展。另外,水电站建设期除进行施工环境影响监测外,并要提前建设完成运行期需要的环境监测设施。工程竣工投产后,环境监测是水电站管理工作的组成部分。

在水电站环境影响评价阶段,要全面搜集工程影响地区的环境状况资料。应尽量搜集已有的监测成果,必要时需作补充监测。水电站建设期的环境监测应针对施工中可能影响的环境因子进行,如噪声、大气粉尘、水质等。建设期环境监测的主要任务是监测施工中污染情况,检验有关环境保护措施的效果。水电站运行期,主要监测电站运行是否符合原设计或环境保护设计要求,水电站对环境的不利影响是否与预测相符,环境保护措施是否达到预期目标。根据监测资料确定是否需要改变运行方式,补做环境保护设施或其他对策,研究在确保环境保护目标前提下,提高电站经济效益或进一步牺牲部分电站效益以减轻或消除对环境的不利影响。水电站对环境有利影响的监测,旨在核实设计的工程环境效益,并进一步促进开发利用,以弥补水电站水库淹没造成的损失,并为库周生态环境向良性循环发展提供依据。

(沈淦生)

huanjing yingxiang

环境影响 (enviromental impact)

建设水电站对周围地区自然和社会环境产生的有利和不利的的作用。自然环境影响主要指对气候的影响,对水文情势、水温、水质、泥沙、地质的影响,对水生生物、陆生生物的影响等。社会环境影响主要指对地区入口、交通、经济的影响,对人群健康的影响,对景观与文物的影响等。工程施工过程对环境也产生一定影响。工程对环境影响的范围,对坝式水电站,包括水库及其周围地

区、工程下游及河口地区等。对引水式水电站工程还包括脱水段。对跨流域开发工程,包括调出流域和调入流域。另外,由于水库淹没、工程占地带来迁移居民对移入地区环境造成的影响。工程对环境影响的程度,与工程的规模、特性、地理位置等有关。水电工程环境影响研究,涉及自然科学和社会科学领域,它是一项新兴的、多学科、综合性很强的工作。涉及这项工作的有气候学、水文学、水力学、地质学、陆生和水生生态学、医学、水库经济、环境经济、系统工程等。从环境生态角度研究工程对环境的影响是在20世纪60年代末,70年代初随着水环境污染日益严重而开始被重视的,美国在1969年首先立法要求作环境影响评价,中国在1979年首次试行了《环境保护法》。

水电站对环境影响的性质,可分为有利或不利、短期或长期、可逆或不可逆、暂时或积累、一次或二次、潜在或明显影响等。水电站运行不消耗燃料,不污染大气,不排出废渣,属清洁能源,对环境有利影响是主要的,对环境的不利影响经过采取对策措施,大部分可以得到减轻或消除。

自然环境影响 自然环境影响包括①气候影响;②水文情势影响;③水温影响;④水质影响;⑤泥沙影响;⑥地质影响;⑦水生生物影响;⑧陆生生物影响等8个方面。

气候影响 水库蓄水形成庞大水体,由于水的热容量大,水体对太阳辐射热量的吸收和释放,直接间接对库区及库周的气候各因子产生一定的影响。一般对植物生长有利,使农业、林业得到很好的发展。主要影响有:①对气温影响,使冬季低温升高、夏季高温降低,对极值影响更明显,减小气温的年变化和日变化,对农业生产有利。②建库使大量陆面变为水面,增加了蒸发量。③对湿度的影响,一般是建库后库区相对湿度减小,库周增大。④对降水的影响,一般建库后使库区降水量减少,库周降水量增加,对农、林业有利。⑤起伏的陆面变为平坦的水面,风力明显增大;由于昼夜库区与库周气温的差别,建库后湖陆风现象增强。建库对气候的影响程度与水体和水面大小有关,影响的范围主要在库区及库周,还与库周的地形有关。库周地形陡峭的,影响范围就小,库周地形平坦的,影响范围就大。

水文情势影响 水电站具有调节能力的水库时,水库调节使下游河道径流过程发生变化:①增加枯水期流量,有利于保证下游水量的要求。②削减洪峰流量,有利于提高下游防洪标准。③中水期增长,可能增加下游两岸浸没。④担任系统调峰任务的水电站,间歇泄流可能影响下游工、农业及生活用水,影响航运、水产;但可以调整运行方式或在下stream建反调节池(水库),保证下游的正常用水。



水温影响 水库水温结构与来水量及库容大小有关。库容较小的如低坝径流式水电站,出入库水温差别不大。库容较大的水库,水温往往是分层型结构,表层直接受气温影响,与天然河道水温相似;中层为斜温层,是表层和底层的过渡;底层为恒温层,水温低也称冷水层。水电站进水口一般设置高程较低,因此出库水流大都来自深层。在冬天气温低,天然河道水温也低,出库水温将高于天然河道水温。在寒冷地区,下游天然封冻河段有可能免除封冻。提高下游河道冬季水温,有利于河道及两岸生态环境。夏天,天然河道水温较高,出库水温远低于天然河道水温,用作冷却水是有利的;如水温过低,影响鱼类繁殖和生长;水稻用低温水灌溉,会影响生长期和产量,但遇高温天气,用出库低温水灌溉和喷洒,可明显改善田间小气候,提高作物产量。

水质影响 水库形成后,入库水流流速大大变缓,改善水质,有利于水产的养殖。主要影响有:①悬浮物沉淀,水体透明度增大,一些有害物质吸附于悬浮物沉积库底,两者均改善了水库水质及下泄水流的水质。②底泥富集有害物质,底泥有被重新冲起释放有害物质的可能,存在二次污染的潜在威胁;也可能通过底栖动物,鱼类和人间食物链的关系,间接危害人类。③水流自净能力随流速降低而降低。④库周、库末有城镇或工矿集中污染处易形成污染带。⑤入库水流含氮、磷等营养物质较多时,由于水库富集作用和藻类大量繁殖导致库水富营养化,水中含氧量急剧减少,鱼类和其他水生生物难以生存,水体发臭,难以用于生活和工业供水。库水年交换次数越少,富营养化威胁越大。后四者是一定条件下建库对水质可能产生的不利影响,需对城镇或工矿排入水库的污水进行处理,以减轻或消除水库污染,保证水质的卫生要求。

泥沙影响 入库水流流速减缓,泥沙淤积。对多泥沙河流,由于河道天然水沙状态被改变,水库淤积,下游清水冲刷,带来一些有利或不利的影。主要有:①下游为堆积性河道时,水库拦沙,可以减轻或消除下游河道淤积,减轻防洪负担,甚至清水冲刷使下游河道下切,降低洪水位,对防洪有利。②泥沙淤积侵占库容,减小水库调节能力。③水库淤积抬高回水位,增加淹没、浸没影响。④泥沙淤积,特别在水库回水变动区,易影响航运;近坝区淤积可能影响船舶过坝建筑物引航道淤塞,影响行船。⑤岩溶地区因水库泥沙淤堵暗河出口,或因建库壅水使库区暗河出口泄流不畅,库周暗河上游有关地区会出现洪涝灾害。⑥水库下游河道,受出库清水的冲刷,河势变化,险工位置变动,增加防洪困难;有的也可能危及桥、涵等建筑物的安全,也可能影响下游河道与坝区通航建筑物的衔接,部分时间(枯

水期)发生碍航。⑦上游建库拦沙后,清水灌溉使下游农田失去一部分天然肥分。⑧水库拦沙,影响下游滩涂围垦,也可能使海岸发生侵蚀后退。⑨水库沉积使下泄水流挟带的天然饵料减少,可能影响下游、河口甚至沿海渔场鱼类的食物来源,影响鱼类资源。

地质影响 地质影响主要有如下几方面:①在发震构造发育的地区水深增加很多的水库,可能诱发地震。②部分库岸由于浸水或水位骤降而失稳,除影响坝岸区居民和土地,坝岸滑坡可能引起涌浪威胁大坝安全,侵占库容,影响航运。③可能引起库周浸没,影响农、林、牧业生产;引起地下水排泄不畅,影响地下水水质,遇大孔性土地基,会引起湿陷,导致水井塌废,建筑物破坏。对已建成的水电站多年观测,初期可能诱发地震、坝岸、滑坡等,经过一段时间的运行,地质趋于相对稳定状态,不再发生这些现象。

水生生物影响 由于形成水库,对原有水生生物会产生影响,但也会产生新的水生生物。对水生生物影响主要有:①建库改变了浮游生物、底栖动物和自游动物(如鱼类)的生境,如流速、水深、水温、水质的变化,使喜流水性的鱼类向库末迁移,喜湖泊性鱼类在库区得到发展。②调节性能较好、水温呈分层型的水库,底层水温低,缺氧,影响鱼类生存,缺氧的底层水经发电泄往下游时,在水流复氧前的河段内将对鱼类生存产生不利影响。③大坝阻隔,在有洄游性鱼类的河段,对洄游鱼类产卵场地和育肥渔场的通道带来不利影响。④水流通过水电站某些泄洪消能建筑物形成氮过饱和时,对下游一定距离内幼鱼的生命产生不利影响。泄洪形成的高速水流区也不利于鱼类的生存。

陆生生物影响 由于水库淹没减小林地面积,影响陆生植物资源;影响陆生动物的栖息环境。

社会环境影响 水电站的经济和社会效益体现在社会环境的变化,包括①地区人口、交通、经济影响;②人群健康影响;③景观文物影响等3个方面。

地区人口、交通、经济影响 主要影响有:①工程及水库淹没带来的居民迁移,电站建成后形成新的居民点,新电源吸引新的工业企业和商业服务业,新城镇的建立等均使地区人口分布和结构发生变化。②工程建设和水库淹没可能中断原有交通,但将由专项迁建费用修建新的交通系统替代,并结合水电站建设和运行管理需要,地区交通将得到发展,水库工程还可淹没险滩,改善水运条件,或开辟新的水运交通。③新电源建成将吸引周围工业企业的建立和发展,增加对农副产品和农业原材料的需求,促进地区农业和加工工业的发展,促进当地资源开发和商业、服务业的发展,增加就业机会,对地区经济带来好处。

人群健康影响 水电站的建设一般是改善了自然

环境,使某些疾病减少发病率,有利于人身健康。但由于工程地区环境特点和工程开发方式的不同,对自然疫源性疾病,虫媒传染病,介水传染病,地球化学性疾病(即地方病)的发病率可能增强、减弱、消失或引起新的疾病输入等。如水库可淹没某些病源体赖以生存、循环的宿主、媒介的孳生地,使某些疾病得到控制;也可能使库周出现有利于某些宿主或媒介的孳生,库区鼠类等媒介逃出库区,密集库周或由于引水、通航、施工队伍集结带人病原体或宿主而使疾病流行。水库蓄水可能使河水中某些元素或化合物沉积富集于库内,或库区岩土中某些元素或化合物经库水浸出,均可影响库水水质,使饮用库水的人或动物体内的微量元素失去平衡,直接或间接地使地球化学性疾病孳长。

景观文物影响 水库蓄水可能浸没或直接淹没风景、名胜、文物、古迹。对有价值的文物、古迹可以进行保护或搬迁,加以保存。水库建设,也可以形成新的风景景观,发展旅游业,吸引游人。

移民影响 受水库淹没而动迁的居民,特别是当地农民,虽然其生活、生产设施可以得到合理的补偿,但动迁仍给移民带来很大影响,移民对移入区也带来一定影响。移民远离原居地,生活习惯、生产方式可能要改变,但居住条件将有所改善。(见移民安置)

施工环境影响 施工环境影响主要有如下几方面:①促进经济发展。施工人员集结,往往形成新的城镇,促进地区经济发展,增加就业机会,为施工改善交通,为施工增设电源,均为工程地区 and 人民带来好处。②施工占地。为施工需要临时征用一些土地,但大部分土地在工程竣工时均可经过平整、复土还田;有的原有荒山、荒地、荒滩,经过工程开挖、堆碴、平整等再加以复土,可以改造为林、牧、耕地,补偿一部分土地资源。③工地污染。主要是粉尘、烟尘、污水、弃碴及噪音造成的污染。这些污染属短期性。

建设水电站是人类开发利用水资源的活动之一,这种开发建设活动对环境产生影响是必然的,只要在建设前认真进行环境影响评价,就可以认清建设水电站对环境的有利影响,并加以充分开发利用。中国的浙江省新安江水电站、四川狮子滩水电站均利用建库后库周气候的改善,将库周发展成庞大良好的柑桔基地;并利用广阔的水面发展渔业,这些经验已广泛被采用。对环境的不利影响,除水库直接淹没的土地资源外,绝大部分可以采取措​​施减轻或消除。这些措施可以是非工程的,如水库调度,可以解决下游环境用水需求,可以改善水库库周环境状况,改善居民健康。中国黄河三门峡水库,年平均入库沙量达 16 亿 t,由于采取了汛期低水位运用,非汛期高水位运行的蓄清排浑运行方式,基本解决了水库淤积问题,为多泥沙河流建设水电站

提供了经验。也可以采用工程措施,如分层取水或在输水系统提供增温条件,均可以解决水库低温水的影响;改进泄流消能设施可以减免下泄水流氮过饱和和缺氧等影响;对鱼类可以采取疏通、保护或人工增殖等措施。所以,只要认真做好环保设计,采取对不利影响的减轻或消除措施,并加强环境监测措施,建设水电站不仅可以取得巨大的经济效益,同时可以做到使环境向良性循环发展。

(沈淦生)

huanjing yingxiang pingjia

环境影响评价 (environmental impact assessment) 对水电站施工过程中和建成后可能对自然环境与社会环境造成的影响进行预测和估计的工作。

水电工程环境影响评价的目的是使有利影响得到合理利用,不利影响得到减轻或消除,从环境保护角度为工程方案论证或项目的评价提供环境方面的依据。它是一项多学科、跨部门、综合性很强的工作,需要多部门的密切配合。

环境影响评价内容 一般包括:环境状况调查,环境影响识别、预测和评价,环境影响综合评价和结论三大部分。

(1) 环境状况调查。调查内容包括气象、水文、泥沙、水温、水质、地形、地质、土壤、陆生生物、水生生物以及人口、社会经济、土地、工业、农业、矿产、人群健康、景观与文物、污染源等。

(2) 环境影响识别、预测和评价。它是在环境状况调查的基础上,根据工程特性和地区环境特点,首先初选部分环境因子进行影响识别,然后再选出主要环境因子,对其变化趋势进行预测,在预测的基础上,对其有利和不利方面作出评价并对主要的不利影响拟定出相应的减轻、消除或改善措施。

(3) 环境影响综合评价和结论。它是在因子预测、评价的基础上,将工程建设对各环境因子产生的影响进行综合分析和评价。它强调工程对环境的综合影响,以便为比较、选择工程方案和项目的评价提供环境的依据。在评价工程对环境的综合影响时,应充分考虑工程对环境的有利影响和不利影响两个方面,特别是应研究在采取措施后对不利影响的减轻或消除程度。

环境影响评价的步骤 一般可概括为五步。

(1) 搜集河流(或河段)规划和拟建工程的开发任务,建设条件及工程特性等资料,并进行初步查勘。在此基础上编制环境影响评价工作大纲。

(2) 全面调查水电工程影响地区的环境状况(包括自然环境和社会环境两个方面),必要时应对一些因子



进行测试,以得到准确的定量分析数据。

(3) 在调查的基础上,识别工程影响的主要环境因子,并对主要因子进行影响预测和评价,对有不利的因子提出减轻、消除或改善措施。

(4) 进行工程对环境影响的综合评价,综合研究环境保护措施,估算相应费用,进行环境影响的经济损益简要分析,提出评价结论和下一阶段设计工作中需要研究的环境影响课题。

(5) 编写环境影响报告书。

发展概况 自从1969年美国在《国家环境政策法》中把环境影响评价定为制度后,瑞典在同年也制定了以环境影响评价为中心的国家环境保护法。日本从1972年开始,加拿大、新西兰从1973年开始,澳大利亚从1974年开始,法国从1976年开始规定环境影响评价制度。国际大坝会议在1973年和1976年的十一、十二届会议上先后立题,分别研究了大坝对环境的影响和环境对大坝的影响。

中国1979年颁布的《环境保护法(试行)》和1990年正式颁布的环境保护法中都明确规定,在进行新建、改建和扩建工程时,必须提出对环境影响的报告书。1986年,国务院环境保护委员会、国家计划委员会、国家经济委员会制定了《建设项目环境保护管理办法》,对建设项目环境影响评价的范围、内容、程序、法律责任等作了具体规定,并且明确指出建设项目的环境影响报告书(表)应当在可行性研究阶段完成。这一管理办法使中国环境影响评价工作逐步趋于正规化、制度化。

(刘峻德)

huanjing yingxiang pingjia fangfa

环境影响评价方法 (methods of environmental impact assessment) 研究修建水电站工程对环境定性定量的影响。评价方法分单因子评价和综合评价两种方法。

单因子评价方法 对水电站各环境因子,如气象中的降水、气温、蒸发、湿度、风、雾,水温中的水温结构、下泄水温变化,水质中的有毒有害物质含量、营养物质富集程度等进行预测与评价。单因子预测评价方法分为定性分析法、定量计算法和定性分析与定量计算相结合的方法。

(1) 定性分析法适用于环境因子本身不能用数量来表示的,或无法获得足够数量和精度的数据来建立定量关系的一些因子,如文物古迹、自然景观、人群健康等。目前常用的定性分析法有类比法、专家预测法、叠图法、生态机理分析法等。类比法是将拟建工程与具有相似自然地理环境及工程特性的已建工程进行比较

分析。根据已建工程对环境因子影响的情况,来类比分析拟建工程对环境因子可能产生的影响。专家预测法是组织有经验的专家对环境因子变化进行预测评价。叠图法是将环境现状与工程对环境因子的情况重叠在一张图上,用不同颜色和图例来表示对环境因子影响的程度。生态机理分析法主要适用于对生物影响的评价,它是利用生物与环境之间的关系,来分析环境变化对生物的影响。

(2) 定量分析法适用于对环境因子变化过程的规律研究较深,且在有关参数确定之后,可以运用定量分析来进行预测和评价的方法,如数学模型法,物理模型法,计算机显象法等。数学模型法是利用数学原理和方法对环境因子进行定量分析的常用方法。如气候中的气温、降水、蒸发、湿度;水文中的流速、流量、水位及水深,泥沙的淤积、冲刷,水温的结构、下泄水量变化;其他如水质的生化需氧量、化学耗氧量等环境因子都可用数学模型法进行预测和评价。物理模型法是利用物理概念建立起具有规律性的物理模型,然后进行定量分析的方法,如环境地质中的库岸稳定、泥沙淤积与冲刷等可根据其物理特性,建立起相应的物理模型进行求解。计算机显象法是利用计算机,将环境因子与工程兴建之间的关系,建立起数学物理模型,通过计算机处理,显示出环境因子的变化规律,并用图象方式表达出来,如对景观的预测、评价可采用此法。

综合评价方法 总体上评价拟建水电站对环境影响的方法。是从环境保护角度为方案论证提供科学依据的评价方法。

水电站对环境影响的综合评价方法有类比分析法、矩阵分析法、环境质量指标法及模糊综合评价法等。

(1) 类比分析法。它是为拟建水电工程对环境的影响在性质上作出全面分析和在总体上作出判断,将可以类比的已建工程对环境产生的影响,作为评价拟建工程对环境影响的主要依据。

(2) 矩阵分析法。它是国际上常用的方法,有多种形式,以国际大坝委员会建议的方法为例,是利用矩阵表格形式,反映工程开发活动(A)与环境因子(E)之间相互关系(见表)。以纵列为A,表示工程开发活动的作用特征,国际大坝委员会将其概括分为5大类53项,以横行为E,表示工程对环境的影响,同样概括分为6部分共61项,并用数字、符号表示影响的性质、大小及可能性等。评价的程序是先选择本工程在开发活动中的实际项目,从53项中选有关的填入纵列,再从61项环境因子中选择本工程需要评价的环境因子填入横行,根据环境影响预测分析结果,把本工程开发活动中各种作用对环境因子的影响,按照表下所列符号

国际大坝会议环境影响评价矩阵表

项目影响评价矩阵A		(一) E100 对社会经济的影响					(二) E200 对地球物理的影响					(三) E300 对水的影响			(四) E400 对气候的影响	(五) E500 对陆生植物 与水生动物 的影响			(六) E600 对陆生动物 与水生动物 的影响		
		E101 工业和农业	E102 林业	E103 自然资源保护	E104 人类健康	E105 其他	E201 地质	E202 地震	E203 海岸线稳定	E204 其他	E301 BOD ₅ 等	E302 水温	E303 其他	E401 局地气候	E501 森林	E502 珍稀植物	E503 其他	E601 哺乳动物	E602 珍稀动物	E603 其他	
A100 水库 兴建的 目的	A101 灌溉																				
	A102 发电	+3cPMY																			
	⋮																				
	A106 航运																				
	⋮																				
	A109 娱乐																				
	A110 其他用途																				
A200 工 程 施工和 建筑物	A201 大坝																				
	A203 导流																				
	A209 船闸																				
	⋮																				
	A214 其他																				
A300 产 生 影响的 场所	A301 淹没区																				
	⋮																				
	A309 其他																				
A400 处 理 办法	A401 渔业管理																				
	⋮																				
	A416 移民安置																				
	A417 其他																				
A500 法律 和管 理措 施	A501 税收																				
	⋮																				
	A503 城市和 乡村规划																				

符号说明：

影响性质	重要性	可能性	持续时间	何时发生	采取措施
+有利	1 小	c 肯定	T 临时	I 工程建设后立即发生	Y 实施
-有害	2 中等	p 可能	P 永久	M 经一定时间以后	N 不实施
×可能有	3 大	i 不大可能		L 经长时间以后	
		n 未知			



或数字填入矩阵相关的方格中,如附表所列的+3cPMY表示建设水库发电对工业和商业是:有利影响、影响大、肯定产生、是永久的、建成一定时间后产生、要采取改善措施。从矩阵表即可综合评价工程的环境影响,并要进一步研究采取改善措施及其对影响的反馈作用。

(3) 环境质量指标法是通过环境因子的物理性质及变化规律的研究与分析,建立起评价函数曲线,通过此曲线,将这些环境因子的现状值(即工程建设前)与预测值(即工程建设后)转换成统一的无量纲的环境质量指标,由此计算出工程建设前、后各个因子环境质量指标的变化值,最后,再根据各个因子的重要性(即权值),将各个因子环境质量指标的变化值综合起来,便得出工程对环境的综合影响。

(4) 模糊综合评价法,它的基本原理是:首先对环境因子进行剖析,确定因子特征,然后按照因子特征的物理属性及变化规律进行分析计算,在此基础上确定各因子特征的隶属函数及其在评价中的重要程度,用合成法或加权法计算因子的状态。此法在中国湖南东江水电站环境影响评价中首先研究使用。它能适应水电工程对环境影响这样一个复杂的系统,既能反映明确边界特征,又能反映模糊系统特征的方法,并得出一组无量纲的数值,使决策者有一个量值的概念。

(刘峻德)

huonliu

缓流 (sub-critical flow) 弗劳德数 $Fr =$

$\frac{v}{\sqrt{gh}} < 1$ 时的明渠水流形态。平底水槽水流,平原

河道中水的流动等是常见的明渠缓流。

明渠水力学中,按 $Fr > 1$ 或 $Fr < 1$ 划分为急流或缓流。这两种流态的特性是相互对应的。

明渠缓流特性: ① $Fr < 1$ 表明明渠断面平均流速 v (m/s) 小于静水中的波速 $c = \sqrt{gh}$ (h 为明渠水深, m; g 为重力加速度), 因此, 流动若受干扰, 其扰动波将能向上游传播, 如挡水建筑物的回水可影响到上游较远的范围。② $Fr < 1$ 表明水流单位动能小于单位势能, 水流惯性力作用小于重力作用。③ 明渠缓流特性还可由断面比能 E_s 与水深 h 的关系图(见急流)说明, 缓流的条件是

$$h > h_c, \quad \frac{dE_s}{dh} > 0$$

式中 h_c 为临界水深。

均匀流状态下, 常用水面比降 i 大于或小于临界比降 i_c 来判定明渠中是急流还是缓流。均匀缓流的条件是

$$i < i_c$$

明渠中缓流到急流的过渡形式, 通常是跨越临界水深的跌水曲线(见堰流)。

(时启燧)

Huang He shangyou shuidian guihua

黄河上游水电规划 [hydropower development planning of the upper reaches of Huanghe (Yellow) river]

据水利水电规划设计总院1989年编制的《十二大水电基地》,黄河上游从龙羊峡到青铜峡河段安排有龙羊峡、拉西瓦、李家峡、公伯峡、积石峡、寺沟峡、刘家峡、盐锅峡、八盘峡、小峡、大峡、乌金峡、黑山峡(小观音和大柳树两级开发或大柳树一级开发)、沙坡头和青铜峡等16(或15)级水电站(见图)。上述梯级总库容419.95(454.89)亿 m^3 , 利用水头1114.8(1107.8)m, 总装机容量1435.48(1425.48)万kW, 年发电量508.63(509.16)亿 $kW \cdot h$ 。其中龙羊峡、刘家峡和黑山峡3座水电站具有良好的调节性能, 是黄河干流上游河段协调各综合利用部门需要、取得综合利用最佳效益的3座控制性枢纽。龙羊峡以上河段还没有编制规划。

除上述主要梯级水电站外, 还可以修建一些低水头中型水电站。

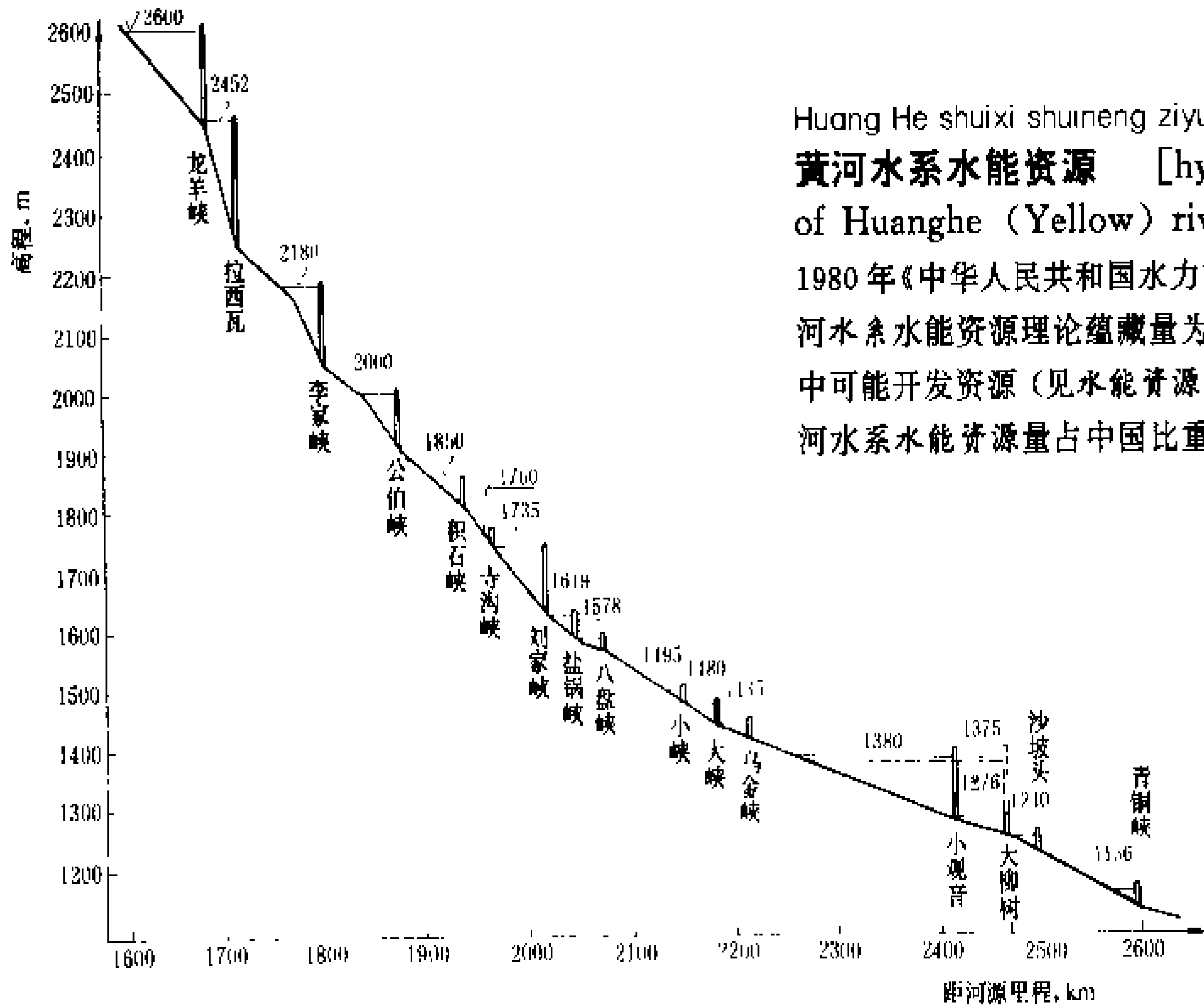
按流域面积计, 黄河为中国第二大河, 蕴藏有丰富的水能资源(见黄河水系水能资源), 主要分布于干流, 干流上游河段占比重较大。习惯上以内蒙古自治区托克托县河口镇以上称为上游。在上游河段中, 青海龙羊峡至宁夏青铜峡河段的径流丰富, 落差巨大, 川地与峡谷相间, 地形及地质条件较好, 是水电开发的重点河段。黑山峡以下至河口镇, 黄河流经宁夏、河套平原, 河道展宽平缓, 是中国重要粮食基地之一。黑山峡至青铜峡的中卫和中宁灌区、青铜峡以下的青铜峡灌区和内蒙古河套灌区是自秦汉起即开始开发、具有悠久历史、规模较大的集中连片灌区, 仰赖黄河干流供水。兰州市位于上游中段沿岸, 海拔高程较低的部分市区防洪标准不高。由于黄河干流在宁夏流向改为自南向北, 春季上游河道解冻时间早于下游, 造成冰塞, 使沿黄河两岸农田和居民点受到凌汛威胁和灾害。因此, 黄河上游干流的开发除以发电为主外, 还兼有灌溉、防洪与防凌任务。

中华人民共和国成立后, 首先对黄河开展规划工作。1955年7月, 第一届全国人民代表大会第二次会议批准了由黄河规划委员会编制的《黄河综合利用规划技术经济报告》, 明确了黄河的治理开发任务、规划原则和主要梯级。此后, 有关勘测设计部门对黄河上游梯级开发方案做过多次研究, 黄河龙羊峡至青铜峡河段梯级开发方案的基本格局已经形成。龙羊峡水电站

多年平均年径流量占青铜峡水利枢纽的 60%，具有多

术经济指标见龙羊峡水电站、刘家峡水电站、李家峡水
电站。

(赵毓崑)



Huang He shuixi shuinneng ziyuan
黄河水系水能资源 [hydropower resources
of Huanghe (Yellow) river system] 据
1980 年《中华人民共和国水力资源普查成果》统计,黄
河水系水能资源理论蕴藏量为 3552 亿 kW·h/a, 其
中可能开发资源 (见水能资源) 1170 亿 kW·h/a。黄
河水系水能资源量占中国比重仅为 6%。水系内部干
支流水能资源量的分
布见表。

黄河干流全长
5464 km, 流经青海、
四川、甘肃、宁夏、内
蒙古、陕西、山西、河
南、山东等省 (自治
区), 注入渤海。黄河
支流较多, 但流域面
积大于 1 万 km² 的
仅有洮河、湟水、祖厉
河、清水河、大黑河、

黄河上游梯级水电站布置图

年调节库容, 对其下游的各个梯级的径流调节起控制
性作用, 是龙头梯级。刘家峡水电站位于兰州市上
游, 水库库容亦较大, 除发电外, 还可兼顾兰州市防
洪任务。黑山峡河段在黄河干流上游开发中有承上启
下作用, 可对上游各梯级水电站按发电要求下泄的水
量进行反调节, 以满足宁夏和内蒙古灌区的灌溉用水
要求, 并控制汛期下泄流量, 满足下游河段防凌要
求。黑山峡河段有大柳树一级开发和小观音、大柳树
两级开发两个方案, 尚未选定。黑山峡以下至河口镇
河段, 则根据灌溉及其他用水部门的需要设置以供水
为主要目的的梯级枢纽, 同时并取得发电效益, 例如
青铜峡水利枢纽等。

龙羊峡水电站、刘家峡水电站、李家峡水电站的技

无定河、汾河、渭河、伊洛河和沁河共 10 条。流域内
平均年降水量仅约 400 mm, 除黄河干流具有丰富的
水能资源外, 支流的水能资源量很小。干流的理论蕴藏
量占水系的 73%, 可能开发资源量占 89%。

黄河干流自河源至玛曲段长 1182 km, 因水量小
且缺优良坝址, 可开发水能资源较少。自玛曲至野狐峡
段长 413 km, 水面落差 820 m, 水能资源理论蕴藏量
393 亿 kW·h/a。本段河谷狭窄, 有可开发水电站 8
座, 可装机 5680 MW, 年发电量 241 亿 kW·h。野狐
峡以下至青铜峡河段长 1009 km, 水面落差 1447 m, 具
有理论蕴藏量 1013 亿 kW·h/a。本段峡谷与山间盆
地相间, 是水能资源最丰富的河段, 被列为中国近期开
发的重点。本河段有可能开发水电站 16 座, 可装机

黄河水系可能开发水能资源统计表

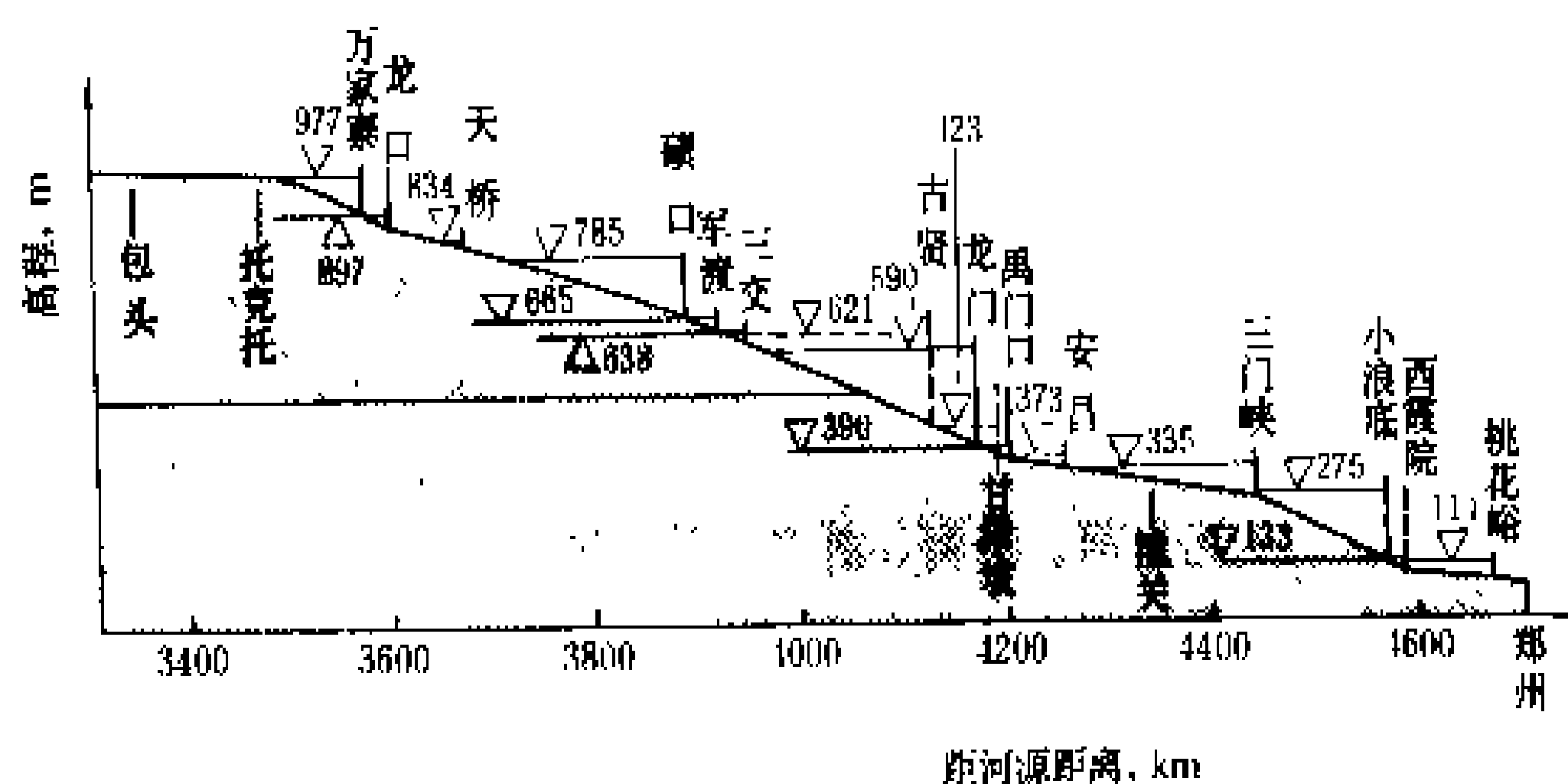
河流名称	流域面积 (km ²)	多年平均 流量 (m ³ /s)	河 道 长 度 (km)	落 差 (m)	利 用 水 头 (m)	理 论 蕴 藏 量 (亿 kW·h/a)	可能开发资源		
							电站 座数	装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kW·h)
黄河全水系						3552	415	28003	1170
其中:									
干流	752443	1744.5	5464	4830	3012	2607.5	43	25136	1037
洮河流域	25527	163	673	2631		126.8	14	594	34.4
大通河流域	15130	92.3	558	2793	884	101.7	11	541	28.1
渭河流域	134766	324	818	2905	80.7	75.1	10	93	3.9
其他支流						640.9	337	1639	66.6

12330 MW,其年发电量为 499 亿 kW·h。其中龙羊峡、李家峡、刘家峡、盐锅峡、八盘峡、大峡、青铜峡等水电站已开发。自青铜峡至河口镇河流经过冲积平原,仅有 3 座可能开发水电站,且规模较小。自河口镇至禹门口是黄河干流第二个峡谷段,但来沙量剧增。本河段可开发水电站 8 座,装机容量 4400 MW,其年发电量为 170 亿 kW·h。自潼关至孟津是干流第三个峡谷段,有可能开发水电站 3 座。其中三门峡水利枢纽已经建成,小浪底水利枢纽拟将开工,都可结合综合利用发电。在孟津以下河段,没有可能开发资源。

(曹学敏)

Huang He zhongyou shuidian guihua

黄河中游水电规划 [hydropower development planning of the middle reaches of Huanghe (Yellow) river] 根据黄河水利委员会编制的《黄河治理开发规划简要报告》和《黄河北干流



黄河中游水电站布置图

三门峡—禹门口河段梯级开发规划》,提出两个开发方案。第一方案的梯级由万家寨、龙口、天桥、三门峡、军渡、三交、龙门、禹门口、三门峡、小浪底西霞院和桃花峪共 12 座枢纽组成。第一方案中的龙门枢纽水库淹没了中国著名的壶口瀑布,为不淹壶口瀑布提出了第二方案,由古贤、甘泽坡、安昌替代第一方案中的三交、龙门、禹门口 3 座枢纽,即三交坝址下移到壶口瀑布上游的古贤,瀑布下游再设另外两级。这两个方案的梯级布置见图,图中三交以下、三门峡以上,实线为第一方案,虚线为第二方案。共利用水头 721(713) m,具有总库容 503(534)亿 m³,发电总装机容量为 805.2(838.8)万 kW,年发电量 270.77(271.99)亿 kW·h。

黄河干流自内蒙古自治区托克托县河口镇至河南省郑州市桃花峪为中游河段,河段长 1206 km,落差 890 m,其上段自河口镇到禹门口为峡谷河段,壶口瀑布位于该河段,两岸为山西、陕西两省黄土丘陵沟壑区,是黄河泥沙的主要来源。禹门口至潼关有汾河和渭河两大支流汇入,是洪水的主要来源,该河段为河道宽

浅散乱的游荡性河流。三门峡以下至小浪底又为峡谷河段。小浪底以下河谷逐渐展宽。据此确定黄河中游河段的开发任务为防洪、减淤、灌溉、发电、供水和防凌等。

1955 年 7 月中国第一届全国人民代表大会第二次会议通过了由黄河规划委员会编制的《黄河综合利用规划技术经济报告》,确定在中游首先建设三门峡水利枢纽,担负防洪、发电等综合利用任务。三门峡枢纽建成后,黄河水利委员会重点研究托克托至禹门口的开发方案,把原规划提出的以发电为主的多级低水头径流式水电站开发方案改为以防洪、减淤、发电、供水为开发目标的有控制性水库枢纽的开发方案。

现提出的开发方案中有碛口、龙门(或古贤)、三门峡和小浪底 4 座较大水库,是控制黄河中下游洪水、调节泥沙的骨干枢纽,同时还可提供电力和电量。三门峡水库以防洪为主,其技术经济指标见三门峡水利枢纽。小浪底水利枢纽水库总库容 126.5 亿 m³,主要任务也是防洪,并可调节泥沙。小浪底水电站利用水头 139 m,装机容量 180 万 kW,平均年发电量 50 亿 kW·h。碛口水库总库容 124.8 亿 m³,调节库容 27 亿 m³,利用水头 120 m,装机容量 150 万 kW,平均年发电量 51.5 亿 kW·h/a。桃花峪枢纽为远景削减洪峰的枢纽。万家寨水利枢纽担负供水任务,并具有发电效益。三门峡已经建成,小浪底和万家寨已列入国家建设计划。其他枢纽的水库库容不大,主要用于发电和引水灌溉。

(赵毓崑)

huitian guanjiang

回填灌浆 (backfill grouting) 在混凝土衬砌的背面或回填混凝土周边,对混凝土浇筑空隙的灌浆。

回填灌浆的主要作用是提高建筑物的整体性,增加密实性和防渗性。

回填灌浆应用最多的是地下工程,如隧洞顶拱部分的混凝土衬砌与岩石之间的回填灌浆。这项工作要求在衬砌混凝土达到 70% 设计强度后尽早进行。

灌浆孔布设在顶拱部位,用风钻钻孔,孔深穿透衬砌层深入岩石 10 cm。灌浆依照分序加密的原则进行,使用水灰比为 1~0.6 的浓水泥浆灌注,当注入量大时,灌注水泥砂浆。

使用混凝土封堵孔洞时,在顶部也需进行回填灌浆,灌浆管路是预埋的,多使用水泥砂浆或在水泥浆中掺加粉煤灰灌注。

回填灌浆质量检查,一般是在该部位回填灌浆结束 7 天后通过钻检查孔进行。检查孔合格的标准通常

为：在设计压力下，10 mm 内，向孔内注入水灰比为 1（或 2）的水泥浆量小于 10L 时，认为合格。有时还借助于钻孔取芯，协助检验灌浆质量。

（孙 判）

hunheshi shuidianzhan
混合式水电站（composite type hydropower station）
见引水式水电站。

hunliushi shuilunji
混流式水轮机（Francis turbine）
水流由辐向进入转轮，沿其叶片自轴向流出，将水流能量转换为机械能的反击式水轮机，又称为辐向轴流式水轮机。混流式水轮机的使用水头范围一般在 30~700 m，大、中型常规式机组多用到 400 m 左右。

结构及其特点 混流式水轮机结构简单，主要部件包括蜗壳、座环、导水机构、顶盖、转轮、主轴、导轴承（见水轮机导轴承）、底环、尾水管等，见图 1，图中同时标示出水流流向。蜗壳是引水部件，形似蜗牛壳体，一般为金属材料制成，圆形断面。座环置于蜗壳和导水叶之间，由上环、下环和若干立柱组成，与蜗壳直接连接；立柱呈翼形，不能转动，亦称为固定导叶。导水机构由活动导水叶、调速环、拐臂、连杆等部件组成。转轮与主轴（见水轮机主轴）直接连接，是该类型水轮机的转动部件，转轮由上冠、下环和若干固定式叶片组成，其外形和各组成部分的配合尺寸根据其使用的水头不同而有所不同。尾水管是将转轮出口的水流引向下游的水轮机泄水部件，一般为弯肘形，小型水轮机常用直锥形尾水管。

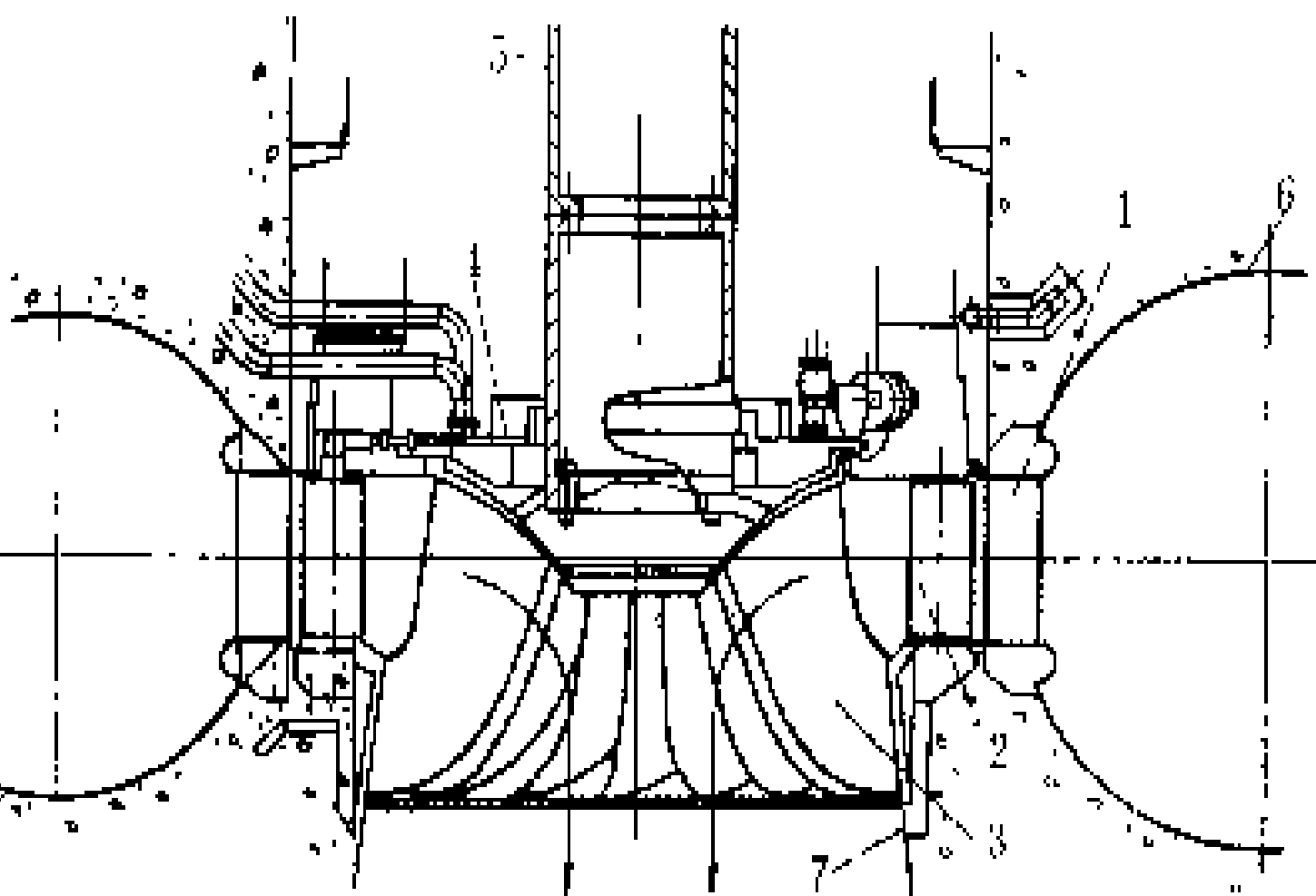


图 1 混流式水轮机结构剖

1 座环；2 导水机构；3 转轮；4—顶盖；5—主轴；
6—蜗壳；7 尾水管

发展简史与趋势 1847 年，美国人 J. B. 弗朗西斯（J. B. Francis）提出一种水流由外向内流动的同心式水轮机，如图 2 所示，其导向机构在转轮外部，尾水管呈圆锥形。该水轮机经不断改进、完善，形成了现代

的混流式水轮机，也称为弗朗西斯式水轮机，近年来的发展趋势是高水头、大容量、高比转速和高效率。当前，世界上使用水头最高的混流式水轮机是奥地利的豪依斯林（Haüsling）水电站，其最大水头为 734 m，单机出力为 180 MW。单机出力最大的混流式水轮机是美国的大古力三厂（见大古力水电站）的第 22 号至 24 号机组的水轮

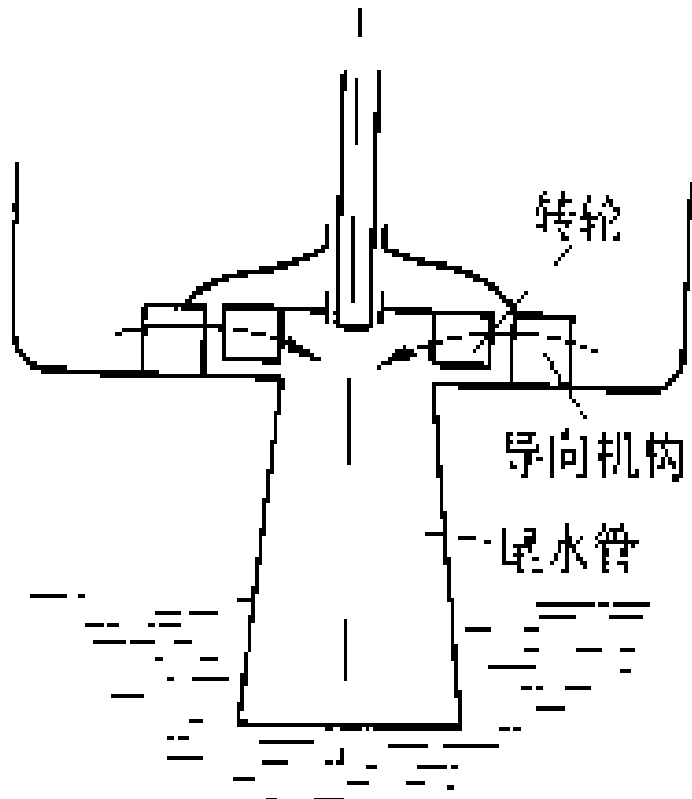


图 2 弗朗西斯式水轮机示意图

机，其额定出力为 716 MW（最大水头为 108.2 m），转轮的最大外径为 9.9 m。苏联的萨扬-舒申斯克水电站（Саяно-Шушенская ГЭС）最大水头 220 m，单机额定出力 650 MW，其水轮机最高效率为 95.8%。中国单机出力最大的混流式水轮机为龙羊峡水电站水轮机，其额定出力为 326.5 MW，转轮直径 6 m；使用水头最高的为鲁布革水电站，其最大水头为 372.5 m，单机额定出力为 153 MW，最高效率为 94.6%。

（史毓珍）

hunningtu
混凝土（concrete）
由胶凝材料、水和骨料，按适当比例配制，经混合搅拌，硬化成型的一种人工石材。按胶凝材料的不同，可分为水泥混凝土、石膏混凝土、沥青混凝土（见沥青混凝土施工）等。通常所称的混凝土是以水泥作胶凝材料，以砂石为骨料的水泥混凝土。它是一种用途极为广泛的工程材料，常用于工业与民用建筑、水工建筑、港航建筑及地下建筑等土建工程。

在混凝土中，水泥和水成为水泥浆，它包裹着砂子表面并填充砂子的空隙而形成砂浆，砂浆又包裹石子表面并充填石子的空隙，形成一个紧密的整体。其中，水泥浆是混凝土中的活性成分，硬化前它能在砂石颗粒之间起润滑作用，使混凝土拌合物具有施工所需要的和易性，硬化后它能够将砂石牢固地胶结起来，成为具有强度的水泥石。石子和砂分别称为混凝土的粗、细骨料，一般不与水泥浆起化学反应，其作用是构成混凝土的骨架，并减少混凝土由于水泥硬化而引起的收缩。混凝土拌合物具有可塑性，可以浇筑成各种形状和尺寸的结构物和构件。

为改善混凝土性能和降低水泥用量，常在混凝土中掺少量外加剂（如加气剂、减水剂、促凝剂、缓凝剂等）和适量的掺合料。掺入外加剂后改性效果显著，已成为混凝土中不可缺少的成分。



为确保混凝土质量,首先必须合理选择原材料,并结合试验,正确进行混凝土配合比设计,而且应严格控制其配料、搅拌、振捣和养护各环节的质量(见混凝土制备)。

对混凝土质量的衡量,工程上常以其标准试件抗压强度的大小,划分混凝土的强度等级(即标号),也有同时以其抗拉强度划定标号的;在道路工程中常以抗折强度划定标号。有些水工建筑物,还须对混凝土提出抗渗和抗冻的要求,分别以其承受水压大小及经受冻融循环的次数,划分抗渗标号和抗冻标号。

不同容重混凝土有其不同使用功能:

(1) 普通混凝土:容重为 $1900 \sim 2700 \text{ kg/m}^3$,一般为 2400 kg/m^3 左右,在房屋、桥梁及水工建筑等土建工程中最为常用。

(2) 重混凝土:容重大于 2700 kg/m^3 ,最大可达 3000 kg/m^3 左右,常用于防辐射等防护混凝土或水利水电工程中的抗冲耐磨混凝土。

(3) 轻混凝土:容重小于 1900 kg/m^3 ,通常多用于保温、隔音等非承重混凝土,水工混凝土一般不使用轻混凝土。

(姜贵煮)

hunningtuba shigong

混凝土坝施工 (concrete dam construction)

以水工混凝土为筑坝材料,修建坝的过程。施工方法有现浇混凝土和预制混凝土两种。

现浇混凝土又分为常态(常规)混凝土和碾压混凝土两种。常态混凝土施工一般是以一定配合比的砂、石、水泥、掺和料和外加剂加水拌和成流态混合物,在施工现场浇入按建坝程序和大坝施工要求所组立的浇筑分块模板内。经过养护,混合物凝结成具有相当强度的固体大块(即大坝混凝土浇筑块)。经分坝段逐层逐块浇筑并按设计要求进行坝段间和分块间的接缝灌浆等措施,使各分块联成整体即构成混凝土坝。碾压混凝土施工法是不分块,不分层整坝体浇筑,用类似填土工程的施工工艺,分层铺干硬性混凝土,用振动碾压实,全断面连续浇筑到顶。这种方法一般只用于大体积混凝土(结构断面最小边长大于 2m)及素混凝土(混凝土结构中不配置钢筋等加劲材料)。由于碾压混凝土的防渗与抗冲耐磨性能较差,所以有的工程在迎水面包一层常态混凝土防渗,在下游溢流面包一层抗冲耐磨混凝土。预制混凝土筑坝法是以预制混凝土构件在现场拼装,构件接头或接面处填筑流态混凝土或水泥砂浆联结成整体。中国湖北省陆水水电站的主坝为混凝土砌块重力坝。它是以预制混凝土块体用水泥砂浆砌筑成整体的。其最大坝高为 49m ,坝体工程量 17.4 万

m^3 。当前世界上的混凝土坝,绝大多数是常态混凝土法施工的,预制混凝土施工的极少。碾压混凝土是一种新兴的施工方法,正在发展,有关其具体施工方法见碾压混凝土施工。

混凝土坝施工的主要程序 包括施工准备、施工导流、地基开挖与处理(见石方开挖、岩基处理、软基处理)混凝土制备、混凝土浇筑、接缝灌浆及基础帷幕灌浆等。

(1) 施工准备。为大坝施工创造条件和供应器材设备的工作。主要有:①修建下基坑道路,一般要求结合上、下游围堰和坝基开挖出渣线布置。②施工机械布置与安装,如修建施工栈桥、缆索式起重机平台及大型浇筑机械的安装等。③修建混凝土供应线,即由混凝土拌和系统通往大坝的运输线。④设置制冷及制热系统,这是对高坝及不良气候地区特殊要求的施工工厂设施。(见混凝土工程施工)

(2) 施工导流。由于混凝土坝施工期间坝面过水对工程的损失和风险较小,故采用的导流标准较土石坝低,并且尽可能采用枯水期导流。汛期利用坝体缺口或设置底孔、梳齿等泄水。如果一个枯水期坝体不可能抢出枯水位,可以考虑布置过水围堰,汛期围堰过水,汛后恢复基坑再接着施工。这是混凝土坝施工导流的一大特点。

(3) 地基开挖与处理。坝基要求有一定的抗压强度和限定的压缩变形值,坝体要与基础接合紧密,胶结良好,因此坝基表层及风化软弱岩层应按设计要求挖除。覆盖层开挖一般采用挖土机或装载机挖装自卸汽车出渣的方法,岩层开挖则需钻孔爆破后再装车出渣。坝基开挖要严格控制开挖线,不应超挖或欠挖,开挖面不应有陡坎及突台。开挖质量相当重要,特别是拱坝的拱座部位。为防止地基渗漏和加强地基承载力,还要将断层、软弱夹层和溶岩等不良地质构造挖除并处理好。为将地基的节理、裂隙胶结起来,使坝基达到坚固、密实与稳定,常用基础灌浆方法处理。在软基上建混凝土坝,要解决地基侵蚀、沉陷、渗漏等问题。

(4) 混凝土制备。坝体使用的水工混凝土,除了一般普通混凝土质量要求外,在不同的坝体部位还有低热、抗渗、抗冻、抗冲耐磨等不同性能要求,故其品种与标号繁多。同时混凝土坝体积大,混凝土量集中,因而混凝土制备设施规模比一般土建工程大,工艺要求高,混凝土质量控制严格,尤其是混凝土温度控制方面。为限制出机温度(混凝土由拌和机中卸出时的温度),要对混凝土原材料和拌和过程采取升温或降温措施。对于高坝或宽河床的长坝,往往受混凝土运输条件的限制而在不同高程或左、右岸分散布置混凝土拌和系统。混凝土系统容量设计要满足月最高浇筑强度,还

要以最大浇筑块的小时浇筑强度复核、使铺料层的覆盖时间保持在水泥初凝时间之内,以免上、下层混凝土接合面胶结不好而出现冷缝。

(5) 常态混凝土浇筑。坝体混凝土浇筑工艺见混凝土工程施工。坝体混凝土施工质量见混凝土质量控制。坝体常分成许多坝段,各坝段又分层、分块进行浇筑。分层的高度,在基础约束区内常采用 0.5~1.5m,脱离约束区后常采用 1.5~3m,也有采用更高的。各分块尺寸都按整坝段宽度,一般不设横向施工缝。分块沿坝段纵向的长度,要考虑混凝土浇筑能力和温度控制条件的限制而设置垂直施工缝。至于薄拱坝或其它坝型,如混凝土浇筑能力强,又能满足混凝土温度控制要求的则可通仓浇筑不设垂直施工缝。浇筑块分缝方式很多,主要的有错缝、纵缝(包括宽缝)及斜缝等。①错缝。多用于低重力坝,浇筑块各层的水平施工缝在同一平面上,垂直施工缝相互错开,形似砖砌体。分块面积小面数量多。可采用中、小型机械施工。施工技术要求与高坝比相对较简单,但浇筑块相互制约、倒仓间隔时间长,坝体升高速度较慢。②纵缝。是用得最多的,适合于高坝施工。它属于柱状法浇筑,即各层的垂直施工缝都在一个垂直面上,形成独立的垂直柱体,后期进行接缝灌浆,将各柱体连成整坝段。上、下游柱体隔开距离的为宽缝,待柱体混凝土收缩到一定程度后,宽缝回填低温、低坍落度(或干硬性)混凝土,有的还要进行宽缝上、下游两个面的接缝灌浆。③斜缝。斜柱体浇筑,上、下游块的接合面呈倾向上游的斜面,必须先浇上游块再浇下游块。支墩坝支墩与面板的接缝为倾向下流的斜缝,它的情况相反,要先浇支墩后浇面板。斜缝施工比纵缝麻烦,但斜缝不一定要进行接缝灌浆。中国福建省安砂坝就采用斜缝施工,不做接缝灌浆。混凝土坝主要施工分缝形式见图 1。

近代大坝施工倾向于大仓面、薄层短间歇浇筑,以通仓为最先进。通仓即整坝段浇筑,不设垂直施工缝。碾压混凝土筑坝可以不分缝且不分坝段整体浇筑,它是一种新施工方法不属于通仓浇筑。由于不分缝,仓面准备工作量少,连续浇筑机械效率高,坝体升高速度快,同时没有纵缝灌浆问题,成为混凝土坝快速施工的一项主要措施。通仓浇筑的困难是仓面浇筑强度大,混凝土温度控制要求高。

(6) 坝体接缝灌浆。坝体混凝土在降温后体积收缩,浇筑块间接缝会张开,破坏了坝的整体性。因此,施工后期进行接缝灌浆。灌浆时间宜选择在冬季浇筑块体积收缩,接缝张开的时候。为加快混凝土冷却,缩短大坝施工期,常采取人工冷却坝体混凝土措施。在施工期间有临时挡水要求的坝体,需按挡水要求,对坝体部分纵缝设灌浆系统,提前灌浆。

混凝土坝施工方法 为实施混凝土浇筑,器材设备吊运及金属结构安装等任务,混凝土坝运输线路和施工机械的工作范围必须能控制整个大坝高度和工作面。大、中型混凝土坝施工方法,根据具体条件可采用缆索起重机法,栈桥法或连续浇筑机械法等。

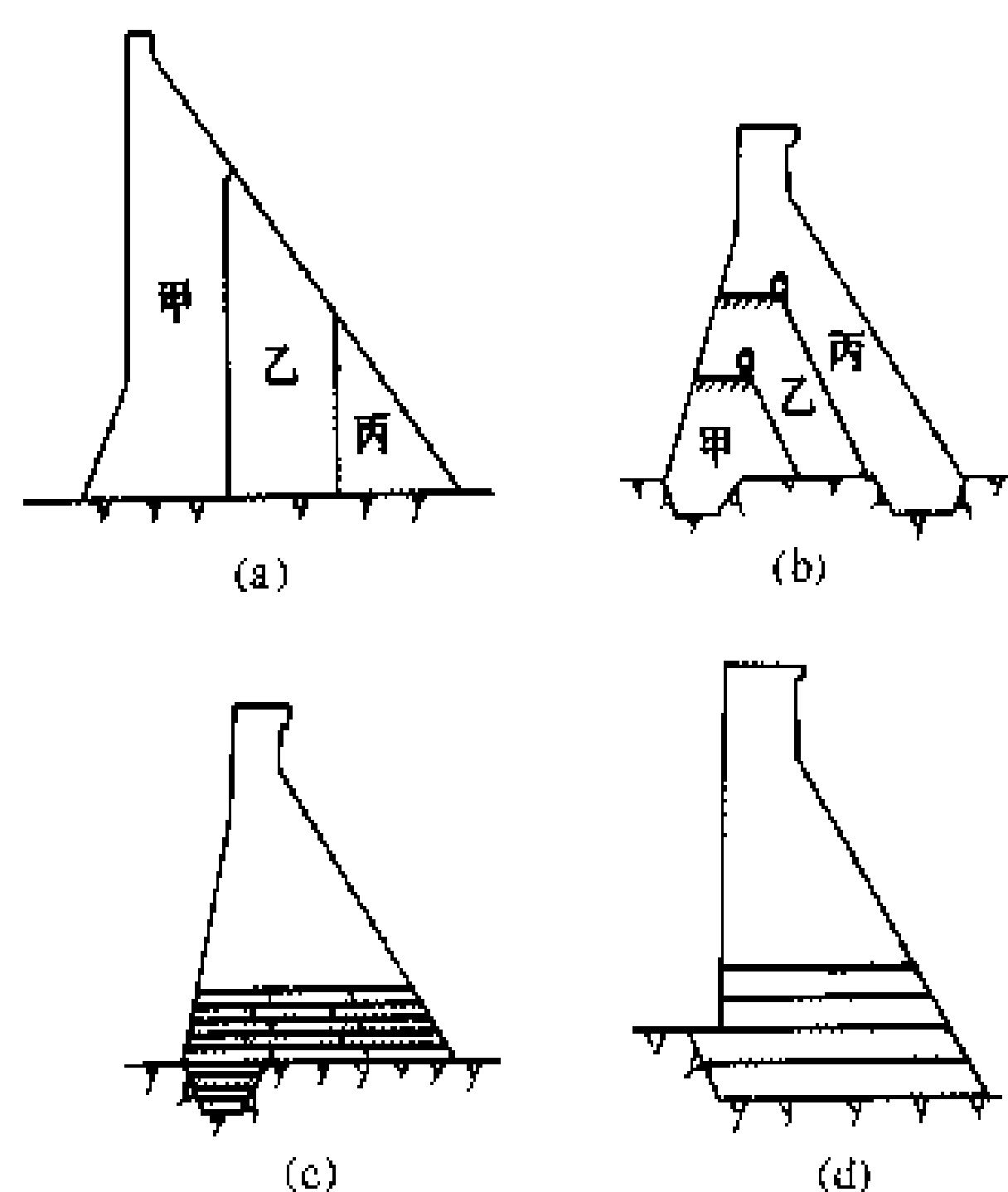


图 1 混凝土坝浇筑分缝示意图
(a) 纵缝; (b) 斜缝; (c) 错缝; (d) 通仓

(1) 缆索起重机法。近代大、中型混凝土坝多倾向于采用缆索式起重机(简称缆机)施工。它最有利于高坝且主坝坝身不太长(一般在 1km 左右)的工程。缆机是一种跨河架空运输的施工机械,利用在承重索上行走的小车吊运混凝土吊罐浇筑混凝土。有固定式缆机(两岸塔架固定不行走的)、平行移动式缆机(即两岸主、副塔可沿各自的轨道平行走动的)及辐射式缆机(副塔为固定式塔架、主塔沿弧线行走)三类。缆机的主要优点是空中运输不压工作面,施工干扰少,机械投产早,撤退晚,工作灵活速度快。主要问题是主索跨度有限制,不适于宽河床工程,同时要求岸边有适宜的平台场地和交通运输条件。刘家峡水电站大坝施工缆机布置见图 2。

(2) 栈桥法。对于宽河床的坝多倾向于栈桥法施工。一般是平行坝轴线,设置可行驶起重机的作业桥,桥上布置门座式或塔式等起重机。由机车或汽车运输混凝土及器材设备上栈桥或到栈桥附近供给起重机。栈桥法的主要优点是机械布置的数量多,可以多仓同时浇筑,有利于河床式电站或坝后式厂房工程。主要缺点是栈桥的费用较高,栈桥架设与起重机械安装压工作面,并占了大坝施工工期。对于高坝往往要布置高、低栈桥,施工很不利。中、小型坝尽可能在基坑面上布置高架长吊臂起重机,避免用栈桥。

(3) 连续浇筑机械法。对于以混凝土浇筑为主而其它辅助工作和金属结构安装工作较少的坝,宜采用

混凝土连续浇筑机械,如胶带输送机或混凝土泵等,只配置少量起重安装机械承担除混凝土浇筑以外的施工任务。近代,混凝土专用胶带输送机具有浇筑速度快,生产率高,施工台班费低等优点,它可薄层均匀铺料,平仓工作量少,同时它已基本解决了运输与卸料过程中混凝土容易离析的缺点。在施工场地窄小,起重机械无法工作或混凝土供应与浇筑条件困难的部位,最适宜布置连续浇筑机械,如坝内底孔与基础处理廊道等回填混凝土,采用混凝土泵浇筑混凝土是有效且经济的方法。

本内容是以柱状法浇筑混凝土,按坝段分块组立模板,利用混凝土吊罐浇筑入仓,分层铺料,插入式振捣器捣实,用冷却水管等措施冷却混凝土后再通过接缝灌浆将分块连成整体。在二次世界大战结束后,特别是到60年代,混凝土坝筑坝技术大为发展,施工机械不断更新,如大跨度快速缆索起重机,高架门座式起重机,各种操作灵便的塔式起重机,平仓振捣机,混凝土切缝机,专用混凝土胶带输送机等的出现,提高了混凝土坝浇筑强度。在混凝土生产方面,由于水泥质量的改进,大量掺用优质粉煤灰和高效外加剂,创新了各项混凝土质量指标。现代电子计算机控制的大型混凝土拌和楼能精确配料,均匀拌和,严格控制出机温度,提供理想的流态混凝土。到80年代实践成功了碾压混凝土筑坝新技术,1980年日本修建了世界上第一座碾压混凝土坝——岛地川坝(Shimajigama),坝高89 m。1982年美国修建了高49 m的柳溪坝(Willow Creek)。1986年中国在福建省建成了高56.8 m的坑口坝。这种施工方法使混凝土能连续浇筑,施工速度快,工期短,碾压混凝土水泥用量少,投资省,是当前的发展趋势。

(章景安)

hunningtuba yuanying guance
混凝土坝原型观测 (prototype observation for concrete dam) 对混凝土坝及其环境进行仪器量测及巡视检查,以了解和评价其实态的技术。观测项目一般有:坝体和坝基的变形、坝体温度、坝体及坝基的渗流、巡视检查等。根据工程实际情况,还可增加有关专门性观测项目,如:坝体及坝基应力、近坝区岸坡稳定、地震、水力学、下游冲淤、坝前淤积等。观测设计要求有明确的意图,选择一个或几个有代表性

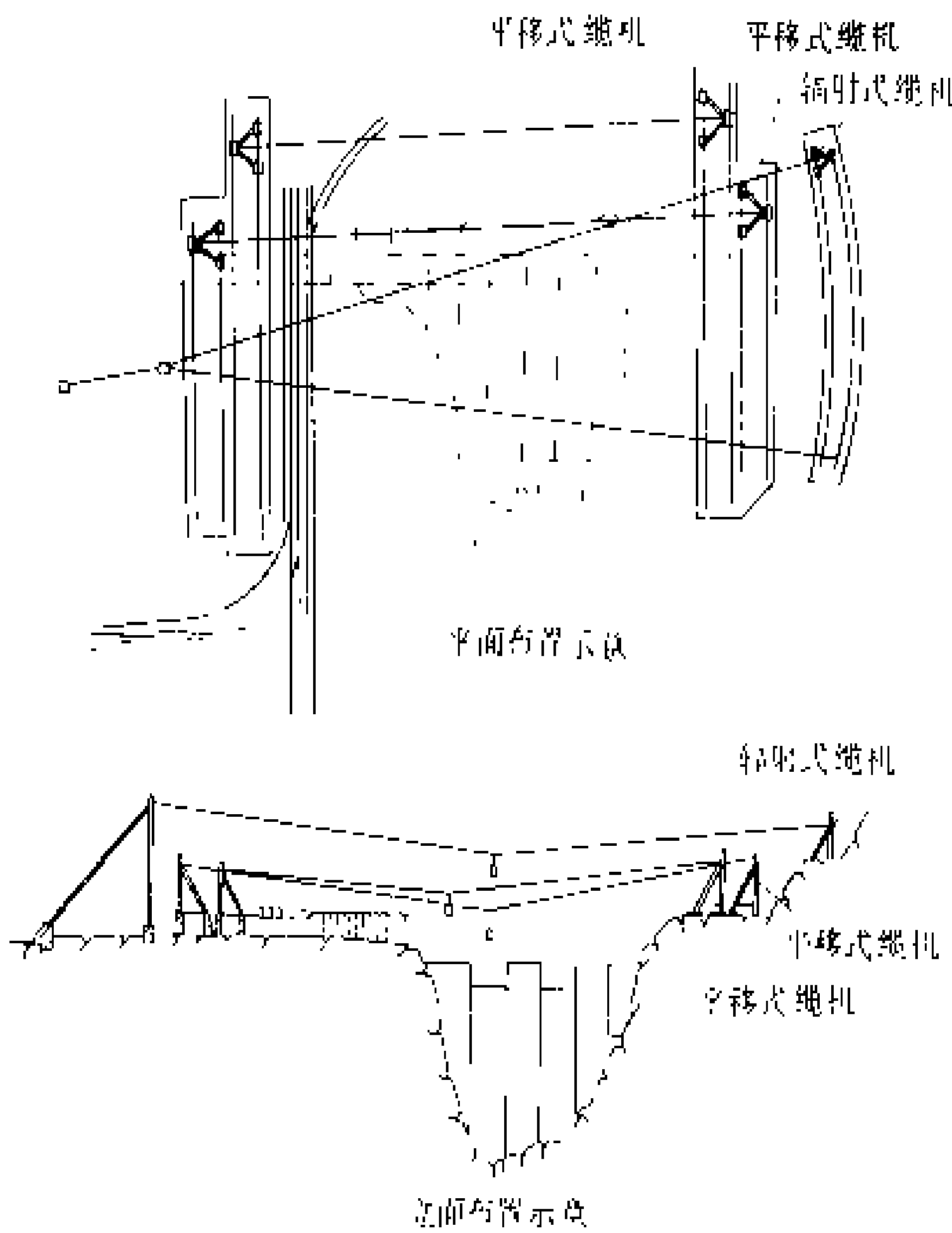
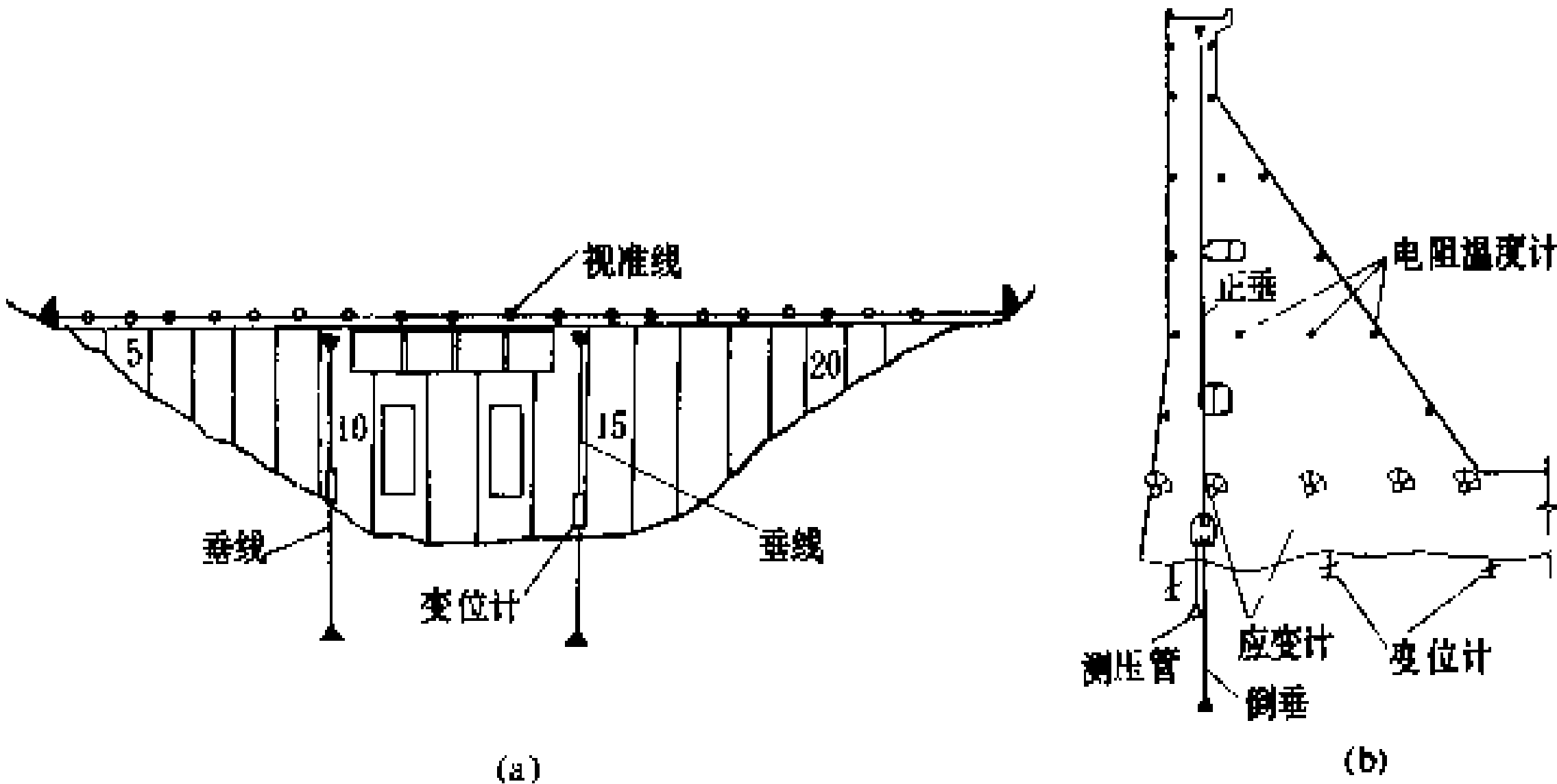


图 2 刘家峡水电站大坝施工缆机布置图

(4) 其他浇筑法。对于中、小型工程多倾向于定点布置起重机,如桅杆式起重机等,或采用无轨自行式起重机施工,如履带式及汽车式起重机等。在机械控制不到的地方,考虑辅以人工或其它措施。此外还常用各种混凝土运输车辆,通过溜槽、溜筒等设备浇筑混凝土。

发展简史 19世纪后期开始出现混凝土坝,到20世纪30年代美国对包尔德(Boulder)重力拱坝做了全面的设计研究,使混凝土坝筑坝技术无论在混凝土材料、施工工艺方法、浇筑质量与温度控制以及坝体接缝灌浆等方面均取得了很大进展,形成了一整套常态混凝土筑坝的施工方法。这个方法的基



重力坝观测仪器示意图

(a) 立面图; (b) 剖面图

的坝段作为观测断面,确定观测方法和仪器设备,并提出精心埋设的要求,创造良好的观测环境,以便按时获



得可靠的资料。重力坝观测仪器布置示意图。观测资料要及时整理,定期整编和分析,以了解和掌握混凝土大坝的变化规律,综合评价大坝的工作状态,并对其安全状况作出预报。如发现异常情况,要设法找出原因,采取处理措施,防止事故扩大。在大坝初次蓄水期间,最易暴露问题和发生事故,其监测工作要制订具体计划,加密测次,以及时评价其运行实态。

变形观测 指坝体和坝基的水平位移、垂直位移、挠度和倾斜、坝体接缝和裂缝的变形、基岩变形等观测项目。重力坝坝体和坝基的水平位移一般用引张线法观测,坝体的水平位移也可用视准线或大气激光准直观测。拱坝坝体和坝基水平位移一般用导线观测,在条件合适时也可用交会法或视准线观测。垂直位移一般采用精密水准法测定标点的高程变化而得出。坝体和坝基挠度分别用垂线和倒垂线观测。坝体和坝基的倾斜一般用精密水准法观测,有条件时也可采用连通管观测。坝体表面和内部接缝和裂缝的开合度可分别采用机械测缝标点和差动电阻式测缝计进行观测。基岩变形目前常用单点或多点位移计观测。

渗流观测 主要包括扬压力、渗漏量、绕坝渗流和渗漏水质分析等。坝基扬压力和绕坝渗流常用测压管观测,而坝体渗透压力一般采用差动电阻式孔隙压力计。坝基和坝体渗漏量常分别分段集中,采用容积法或量水堰进行观测,以确定可能存在问题的部位。水质分析通常是对有代表性的排水孔和绕坝渗流观测孔中的水样作简易分析。

应力、应变和温度观测 指混凝土应力和应变、钢筋(钢板)应力,以及坝体和坝基的温度等观测项目。所用仪器大都是差动电阻式应变计、钢筋计和压应力计,以及电阻式温度计。这些观测项目通常与变形、渗流等观测项目结合布置,以获得最好的效果。

巡视检查 混凝土坝观测中的重要内容,通常由有经验的技术人员承担,用眼看、耳听、手摸、鼻嗅,并辅以简单工具对大坝本身、地基、附属建筑物以及坝上下游附近范围进行现场检查。

(张进平 叶丽秋)

hunningtu banhuo

混凝土拌和 (concrete mixing) 在混凝土制备过程中,将经过配料(见混凝土配料)的混凝土骨料、胶结材料、水及其他原材料搅拌均匀,制成混凝土拌和物的工序。通常以砂、石为骨料,水泥为胶结材料,为改善混凝土的性能常加入外加剂及掺和料。

拌和混凝土通常用混凝土拌和机。混凝土拌和机的型式很多,基本上可分自落式与强制式两类。自落式拌和机的滚筒转动时,依靠重力作用,使筒内混凝土各

组分物料自由下落而互相混合均匀。强制式拌和机的拌和筒固定不动,由筒内转轴上的叶片旋转进行拌和,依靠剪力作用,强迫各组分物料沿滑移面产生相互滑动,以至均匀混合。常用的多为自落式,又分鼓筒形、双锥形等,适用于拌和塑性混凝土和低流态混凝土。强制式拌和机适于拌和干硬性混凝土。

混凝土拌和时,按各组分物料的投料方式,分一次投料法和二次投料法。①常用的为一次投料法,短时间内将全部物料投入。但在短时间内各物料的投入顺序仍有先后。例如采用自落式拌和机时,为减少粉尘,可先加入10%的水,然后加入骨料、水泥和80%的水,最后补足尚缺的水。对强制式拌和机,则在投入干物料的同时,缓慢均匀加入全部水量。②二次投料法是通过改变投料程序,使水泥颗粒充分分散,加速水化作用,改善混凝土性能的一种工艺方法。常用的如水泥裹砂法(见锚喷),此外还有预拌水泥砂浆法和预拌水泥浆法。

混凝土拌和总的时间包括投料时间、拌和时间和出料时间。纯拌和时间为从全部物料投入搅拌筒搅拌时起,到混凝土拌和物开始出料为止所经历的时间。纯拌和时间与拌和机的性能和容量、最大骨料粒径及要求的混凝土和易性有关,如加入掺和料、外加剂或加冰时,要适当延长拌和时间。为保证混凝土的质量,将各组分拌和均匀,拌和程序及拌和时间需通过试验确定。

(王庭济)

hunningtu gongcheng shigong

混凝土工程施工 (concrete work construction)

按设计要求,将混凝土骨料、胶结材料和水按适当比例配制成混凝土,修建建筑物的实施过程。通常采用以砂、石为骨料,水泥为胶结材料的水泥混凝土。为改善混凝土的某些性能,常加入外加剂和掺和料。水电工程在修建坝、水电站及各种水工建筑物时,广泛应用混凝土。混凝土工程的施工,需根据混凝土的品种、性能,施工对象的结构形式、受力条件和质量要求等特点,施工时的气温以及其他施工条件等,采用相应的施工方法。混凝土工程施工的基本内容一般包括:①混凝土制备,包括混凝土骨料的开采和加工,按要求的配合比进行混凝土配料和混凝土拌和。②钢筋和模板的加工制作。③工作面准备。④混凝土运输。⑤混凝土浇筑。⑥混凝土养护。⑦必要时的混凝土温度控制措施。常见的施工方法如以下所述。

工作面准备 浇筑混凝土前,需进行的工作有:①建筑物地基的清理验收。对于岩基,需清除杂物和松动岩石,冲洗干净,排除积水。对于软基,当留有地基临时保护层时,需先行清除并处理好。设有垫层的,需将垫层铺好,必要时适当浸湿。②施工设施的准备,包括

平仓、振捣和缓降设备。需用浇筑平台的,要准备好平台、脚手架等。③模板、钢筋和埋件的安装。④在已浇好的混凝土上面或侧面浇筑混凝土时,需作好工作缝的处理。一般事先用压力水、风砂枪、刷毛机或人工加工成毛面,并清洗干净。

混凝土运输 将混凝土拌和物从拌和地点运送到浇筑仓面的工序。通常对主要为解决两者之间水平距离的运输,称水平运输;对主要为解决两者之间高程差的运输,称垂直运输。

(1) 水平运输分无轨和有轨两种方式。无轨运输主要采用自卸汽车,有时也可采用混凝土搅拌车或其他运输工具。有轨运输可使用标准轨距或窄轨铁路,用机车牵引装有混凝土罐的平台车,将混凝土从拌和系统运送到浇筑仓附近。一些混凝土坝施工时,在适当的位置和高程设有施工栈桥,机车将混凝土运到栈桥上,再用起重机将吊罐吊运入仓。

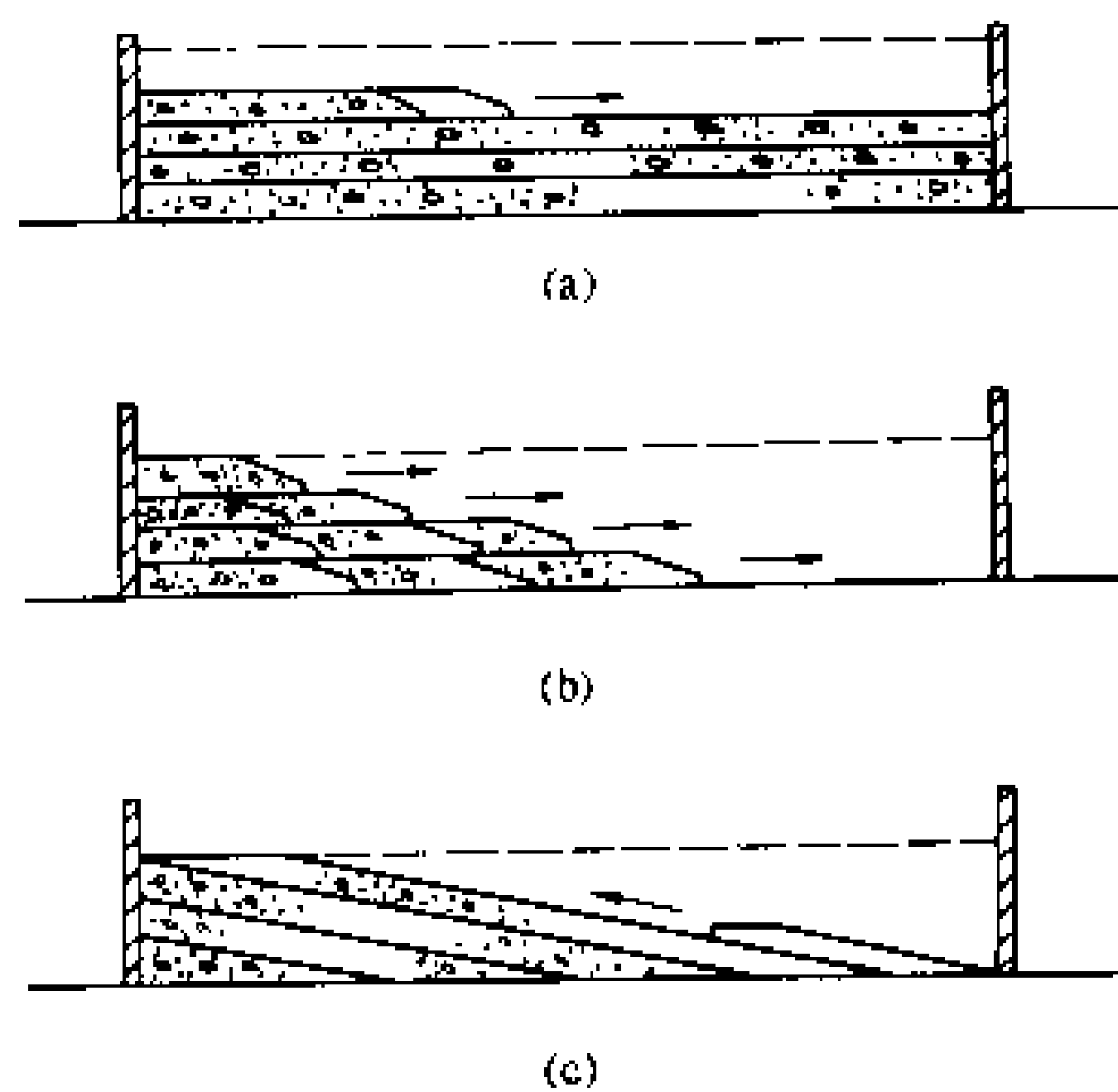
(2) 垂直运输主要采用门座式、塔式或缆式起重机提升混凝土罐。采用门座式或塔式起重机浇筑混凝土坝时,常需配以栈桥。采用缆式起重机吊运混凝土时,不需栈桥,可由汽车或机车牵引混凝土罐车直接运到缆式起重机下面,由缆式起重机将混凝土罐吊运入仓。

(3) 有时也可采用混凝土泵或带式输送机运送混凝土拌和物。这两种设备均属连续输送的机械,可同时解决水平运输和垂直运输的问题。采用带式输送机运送混凝土时,宜用专用于输送混凝土的槽形带式输送机。

常规浇筑法 在现场就地浇筑混凝土,通常多采用常规浇筑法。这是修建各类建筑物时广泛采用的混凝土施工方法。混凝土拌和物入仓,按照一定的次序、方向和厚度,分层进行浇筑,保持混凝土面平整,均匀上升。混凝土浇筑层的厚度,需根据浇筑仓面大小、拌和能力、浇筑速度、振捣设备性能及气温条件等因素确定。总的要求是能振捣密实,在下面一层已浇的混凝土初凝前,需覆盖上层混凝土,使层间结合良好。一般采用平层浇筑[图(a)],由一端开始向另一端铺料,水平分层进行。当浇筑仓面面积较大,需要及早覆盖,避免下一层初凝,或为了减少高温影响,防止热量倒灌,以保持较低的浇筑温度,有时可采用阶梯浇筑方法[图(b)]。除了某些特定条件,例如汽车直接入仓,进行通仓浇筑外,一般不采用斜层浇筑法[图(c)中→表示铺料方向]。

预制混凝土 当结构条件许可,并且具备吊装设备等条件时,有些混凝土构件可以不就地现浇,而是预先在工厂内或现场附近制作,达到规定强度以后,在现场吊装就位。在水电工程中,坝上的交通桥、启闭机工作桥以及厂房上部的梁、柱结构,常采用预制混凝土构

件。预制混凝土构件因可在工厂内生产,容易控制质量,也有利于产品定型化,可加快模板周转,节省模板费用,并可加快施工进度,减少高空立模的困难。混凝土构件在预制时,要预先设置吊装用的吊环,对吊点位置、吊装应力、刚度及变形等,都要经过设计计算。



混凝土浇筑方法示意图

(a) 平层浇筑; (b) 阶梯浇筑; (c) 斜层浇筑

特殊施工方法 除常规浇筑法和预制混凝土外,还有多种特殊的施工方法,例如泵送混凝土、喷射混凝土、碾压混凝土、预填骨料压浆混凝土、真空作业混凝土、水下混凝土以及预应力混凝土等。

(1) 泵送混凝土。用混凝土泵或混凝土泵车,将混凝土通过导管压送到浇筑仓内的施工方法。这种方法适用于场地狭窄、浇筑仓面小、施工干扰、作业困难的部位。在隧洞衬砌混凝土和一些混凝土结构的局部薄结构部位,常采用泵送的方法。泵送混凝土需要较高的坍落度,所用的粗骨料粒径也受到限制,因而单方混凝土的水泥用量较常规浇筑法为高。

(2) 喷射混凝土。以压缩空气为动力,用混凝土喷射机将粗细骨料、水泥、水和外加剂等组成的混合料,喷向岩石表面,粘附在岩石上,经凝结硬化成混凝土。这种方法常用于地下工程施工支护或永久衬砌,也用于保护岩质边坡的稳定。喷射混凝土常与锚杆配合应用,简称锚喷。

(3) 碾压混凝土。用常规的土石方施工机械来运输、摊铺超干硬性混凝土,用振动碾压实的施工方法。

(4) 预填骨料压浆混凝土。将粗骨料预先填入需要浇筑的部位,然后用压力灌入水泥砂浆,使形成混凝土的施工方法。

(5) 真空作业混凝土。在混凝土浇筑、振捣、抹平后,当即用专门的真空脱水设备和真空模板或真空吸盘,在混凝土上面进行真空作业的工艺方法。经过真空

脱水的混凝土,可提高密实性,从而提高其物理力学性能,包括抗压、抗拉强度,减少收缩率,提高抗渗、抗冻及抗冲耐磨性能等。采用周期振动与真空相结合的工艺,可以取得更好的密实效果。真空作业工艺多应用于现浇混凝土,在预制构件生产中亦有采用。

(6) 水下混凝土。按照要求将混凝土拌和物直接浇到水下预定部位的施工方法。

(7) 预应力混凝土。在预制混凝土构件制作过程中,或现浇混凝土在承受主要外部荷载以前,通过张拉钢筋,对混凝土预先施加压力,使产生预应力的工艺方法。预应力混凝土可以改善应力条件,充分发挥结构物作用,减轻构件重量和节约钢材。这一工艺方法广泛应用于各类建筑物构件的生产,在坝工中也有应用。

混凝土工程施工中,对混凝土原材料、配合比、施工过程各主要环节以及硬化后的混凝土,都要进行质量控制和检查。(见混凝土质量控制)

在低温季节进行混凝土施工,必须采取有效措施,以防止混凝土在凝结硬化的初期遭受冻害,造成混凝土强度、耐久性、水密性的损失。低温施工采取的方法主要是加热原材料,对浇筑的混凝土进行蓄热保温,采用蒸汽加热法或电加热法施工以及在混凝土中掺入一定量的外加剂等。

在高温条件下进行混凝土施工,也要采取措施,减小或消除高温的影响。特别是大体积混凝土,一定要按照要求采取混凝土温度控制措施。

(王庭济)

hunningtu guliiao

混凝土骨料 (concrete aggregate) 在混凝土中起骨架作用的粒状填充材料,又称混凝土集料。骨料是松散体,靠胶结而形成混凝土。混凝土的骨料一般采用砂、石材料,分粗和细两种。粗骨料为卵石或碎石,其粒径在 5 mm 及以上至 150 mm。细骨料为天然砂或人工砂,其粒径在 5 mm 以下。骨料在混凝土的组成中所占比例无论按体积或重量都是最大的。

骨料分类 分为天然骨料与人工骨料两类。天然细骨料是由天然料场采集的河砂、山砂(风化砂)、海砂。天然粗骨料是由河滩或山沟等天然料场采集的卵石(又称卵石、河光石)。人工细骨料是用石料破碎、过筛制成的人工砂。人工粗骨料是用岩石(常用的有花岗岩、砂岩、石灰岩、玄武岩等)或大粒径卵石破碎筛选的碎石。

骨料的物理化学性质 骨料的物理化学性质对混凝土的质量影响极大,包括强度、弹性模量、比重与容重、孔隙率、颗粒形状、级配、热性能和有害物质含量等。

(1) 强度。骨料材质的抗压强度直接影响混凝土的强度。所以骨料材料强度不能低于混凝土的强度,但也不能太高,因为混凝土受温度和湿度影响产生体积膨胀时,骨料材质强度过高会导致受力而开裂。一般,骨料材质抗压强度与混凝土标号的比值采用 1.5~2.0。

(2) 弹性模量。骨料的弹性模量多与其抗压强度呈正变关系,对混凝土的徐变和收缩有直接影响,弹性模量高,徐变量减小。

(3) 比重与容重。检验骨料比重的指标是视比重。骨料的视比重是指骨料内部封闭孔隙在内的单位体积烘干后的重量与同体积水重的比值。检验骨料容重的指标是干松容重。骨料的干松容重是指单位体积干松骨料的重量。中国 SDJ17-78《水利水电工程天然建筑材料勘察规程》中规定:水工混凝土细骨料(砂)的比重应大于 2.55,其干松容重应大于 1.5 t/m³;粗骨料的比重应大于 2.6,其干松容重应大于 1.6 t/m³。

(4) 孔隙率。骨料母岩孔隙体积占母岩体积的百分率。骨料内部和表面常有一些毛细孔使骨料吸水和含水。骨料的吸水率与母岩的孔隙率有直接关系。因而孔隙率大,影响混凝土的抗冻性、抗磨性和化学稳定性。砂粒吸水后会导致体积膨胀,称为砂的容胀现象,它对混凝土配合比有重大影响。

(5) 颗粒形状和表面状态。骨料颗粒形状有球形、棱形、片形、针状等。球形多为卵石及河沙,棱形为碎石,针片状多见于薄片岩石。球形骨料拌制的混凝土和易性好。碎石骨料表面粗糙与水泥的胶结良好,同样配比的混凝土其强度较卵石混凝土高。针片状颗粒拌制的混凝土和易性差,同时由于其表面积大,水泥用量也高。

(6) 级配。混凝土中各级骨料粒径颗粒的含量组合比率称为骨料的级配。良好级配的混凝土水泥用量较少,用较少水量能制成和易性好,离析和泌水少的流态混凝土。水工混凝土粗骨料通常按粒径分为四级,其中,“小石”粒径为 5~20 mm,“中石”为 20~40 mm,“大中”为 40~80 mm,“特大石”为 80~150 mm(或 80~120 mm)。其细度模数多采用 6.25~8.30。细骨料一般分为六级,粒径自 0.15~5 mm。细度模数多采用 2.0~3.0。

(7) 热性能。骨料的热性能主要有比热、导热系数、导温系数和热膨胀系数。它们与混凝土温度裂缝的关系密切,与混凝土抗冻融能力有关。石灰岩的热膨胀系数较低,约为 $4.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,是生产混凝土骨料的好材料。天然卵石是一种不均质的混合料,用它拌制的混凝土其热膨胀系数接近平均值,约为 $5.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

(8) 有害物质含量。有害物质包括粘土、淤泥、软弱颗粒、有机杂质、硫化物、云母及化学盐类等。这些

杂质阻碍水泥与骨料胶结,妨碍水泥的正常水化或与水泥中的成分起化学反应,导致混凝土强度和耐久性下降。它们还可能引起需水量加大,减弱混凝土物理性能。中国 SDJ207-82《水工混凝土施工规范》中规定的杂质允许含量见表 1 和表 2。

表 1 细骨料(砂)的质量技术要求

项 目	指 标	备 注
天然砂中含泥量 (%)	<3	1. 含泥量系指粒径小于 0.08 mm 的细屑、淤泥和粘土的总量 2. 不应含有粘土团粒
其中粘土含量 (%)	<1	
人工砂中的石粉含量 (%)	6~12	系指小于 0.15 mm 的颗粒
坚固性 (%)	<10	系指硫酸钠溶液法 5 次循环后的重量损失
云母含量 (%)	<2	
比重 (t/m³)	>2.5	
轻物质含量 (%)	<1	视比重小于 2.0g/cm³
硫化物及硫酸盐含量按重量计 (折算成 SO₃) (%)	<1	
有机质含量	浅于标准色	如深于标准色,应配成砂浆,进行强度对比试验

表 2 粗骨料的质量技术要求

项 目	指 标	备 注
含泥量 (%)	D ₂₀ 、D ₄₀ 粒级 <1 D ₈₀ 、D ₁₅₀ (或 D ₁₂₀) 粒级 <0.5	各粒级均不应含有粘土团块
坚固性 (%)	<5 <12	有抗冻要求的混凝土 无抗冻要求的混凝土
硫酸盐及硫化物含量按重量折算成 SO₃ (%)	<0.5	
有机质含量	浅于标准色	如深于标准色,应进行混凝土强度对比试验
比重 (t/m³)	>2.55	
吸水率 (%)	<2.5	
针片状颗粒含量 (%)	<15	碎石经试验论证,可以放宽至 25%

(9) 碱活性骨料反应。含有能与水泥中的碱产生化学反应的盐类成分的骨料叫碱活性骨料。碱活性骨料反应有两种:碱-硅酸盐类反应与碱-碳酸盐类反应。

碱-硅酸盐类反应。对于蛋白石、玉髓、鳞石英、方石英、火山玻璃、隐晶质变形石英等活性骨料,水泥中的碱(氧化钠 Na₂O 和氧化钾 K₂O)与骨料中的氧化硅起反应,可生成硅酸钠凝胶。硅酸钠吸水后体积膨胀,初期表现为混凝土表面裂缝上出现透明的凝胶分泌物,后变为白色固体,最后导致混凝土破坏。发生碱-硅酸盐类反应的条件一般为:①水泥的含碱量超过 0.6%。②活性骨料含量超过 1%。③处于潮湿的环境中。

碱-碳酸盐类反应。骨料中含有白云石碳酸盐,这类岩石为白云石质石灰岩、方解石质石灰岩中的白云石等。与水泥中的碱与活性骨料的碳酸盐起反应,形成镁的氢氧化合物水镁石 [Mg (OH)₂],使得混凝土膨胀。但在含有白云石、方解石和不溶解材料成分的碳酸盐岩石中,能造成危害性反应的这类活性骨料占一个骨料产地全部天然储量的比例是很少的。

(李景安)

hunngtu jiaozhu jixie

混凝土浇筑机械 (concrete placing machine) 将制备好的混凝土运送、灌注入仓的施工设备。包括混凝土供料运输、入仓吊运与平仓振捣等三类机械。

混凝土供料运输机械 指从混凝土拌和厂向浇筑地点运送混凝土的机械设备,常用的有汽车、铁路机车、胶带输送机及混凝土料罐车等。

汽车运输 最常用的是自卸汽车。混凝土运至浇筑地点后再卸入卧式混凝土吊罐内,由起重设备吊运入仓成直接自卸入仓。采用自卸汽车运送混凝土,机动灵活,应用广泛,但运输成本稍高。当运距较长时,可采用混凝土搅拌车来运送。混凝土搅拌车是在普通载重汽车的底盘上加装一台锥形拌和机所组成,混凝土可在运输途中进行低速搅拌,以防止产生分离。也可先装入混凝土干配料,待运至浇筑地点前 15~20 min 时再启动搅拌机,并加入所需水量进行拌制。

铁路机车运输 用铁路运送混凝土吊罐。铁路轨距有标准轨和窄轨两种。机车一般以柴油机为动力。常在工程量比较集中,并有合适地形条件时适用。

胶带输送机运输 此种设备构造简单,能连续生产,并可直接入仓。在供料地点比较集中,运输距离较近的情况下适用。为避免混凝土在运输过程中产生分离等现象,宜采用混凝土专用的胶带输送机,以保证混

凝土质量。

混凝土料罐车运输 用与吊罐配套使用的专用车辆运送混凝土。在采用起重机吊运混凝土罐浇筑大体积混凝土时,使用混凝土料罐车向吊罐供料,可以节省起重机与吊罐间的摘、挂钩时间,以节省人力,提高混凝土浇筑强度。混凝土料罐车有无轨式与有轨式两种,均采用内燃发动机,全液压操作,其容积有 3、4.5、6、9 m³ 等多种。

混凝土浇筑入仓机械 大体积水工混凝土浇筑,广泛采用缆索式起重机、门座式起重机、塔式起重机或履带式起重机吊运混凝土罐直接入仓,也可采用混凝土泵压送混凝土入仓。

缆索式起重机 简称缆机,在二个支架间的挠性承载索上行走的起重小车进行吊运混凝土的起重机械。有固定式、平行移动式和辐射式三种。

(1)固定式缆机的两支架均为固定的,作业覆盖范围为跨间起重小车工作区间的一条直线,适用于吊运工程量不大的工程。当支点塔架下端固定铰接,上端可垂直于承载索轴线摆动的,称为固定摆动式缆索起重机。其作业覆盖平面比固定式的稍有扩大,一端摆动的为一底宽不大的梯形,两端摆动的是一狭窄的长方形。

(2)平行移动式缆机的两支架(塔架)可在两条轨道上平行移动。这种缆机的作业覆盖平面为塔架移动距离和跨间起重小车工作范围内的一个长方形。由于其作业控制范围大,在大坝混凝土施工中应用最广泛。

(3)辐射式缆机的两支架中,一个固定不动,另一支架(塔架)在轨道上可围绕固定支架作圆弧移动。这种缆机作业覆盖平面是上下底边为弧线的梯形,其作业控制范围虽小于平移式缆机,但由于其基础土建工程量小,所以在混凝土坝施工中也有较多的应用。

混凝土坝施工中缆索式起重机的常用跨距在 300~1000 m 之间,吊钩扬程一般为 120~180 m,常用的起重量 10~20 t,大者达 30 t。

门座式起重机 简称门机。它具有能沿轨道行走的刚性门座全回转动臂起重机,门座下面可通行运输车辆。门机按起重臂架型式分为直臂式和组合式(即象鼻式)二种。可根据施工需要选用。

塔式起重机 简称塔机。机身由塔形钢架的全回转臂式起重机。它具有高而竖立的塔架,起重臂铰接在塔架的顶部,有效工作范围较大。大型塔式起重机,在塔架下部也可通行混凝土运输车辆。

混凝土泵 利用活塞的往复作用,将混凝土沿管道连续输送到浇筑仓面的一种专用设备。其优点是设备比较简单,并能同时完成混凝土的水平垂直运输,因此在施工场地狭窄的隧洞与地下厂房混凝土施工中广泛采用。缺点是一般只能泵送骨料粒径不超过 40~

50 mm,坍落度不小于 5 cm 的混凝土,水泥用量较多,所以不适于大体积混凝土浇筑使用。混凝土泵水平输送距离一般可达 300~500 m,垂直输送高度达 40 m 以上。为提高混凝土泵的机动性与灵活性,在混凝土泵的基础上发展成为输送泵车,它是将混凝土泵装在汽车底盘上,并用液压折叠式臂架管道来输送混凝土,比混凝土泵具有更好的机动性,不需铺设输送管道。

平仓振捣机械 常规混凝土施工常用混凝土振捣器、平仓振捣机等设备。碾压混凝土则需用推土机或平仓机摊铺混凝土,振动碾碾压,如设置结构缝时,尚需用切缝机切缝。

混凝土振捣器 是一种借助动力通过高速回转的偏心装置产生频繁振动,并将这种频繁的振动传给混凝土,使混凝土得到振动密实的机械。有插入式、附着式和平板式等多种,其中插入式振捣器使用最广泛。

平仓振捣机 适用于大仓面低坍落度素混凝土的浇筑。其振捣效率比手持式振捣器高十倍以上,且可大大减轻浇筑工人的劳动强度。目前实用的机型有二种。一种是采用小型低比压液压挖掘机进行改装,在臂端挂装液压振捣器组,它不能在仓面内推运混凝土,而是依靠强烈的振捣作用,在将混凝土振实的同时进行振平。由于其上机身可以回转,所以作业覆盖面广,生产效率高,并可减少机器在仓内的走动。另一种是在小型低比压推土机的后端,加设一可挂装液压振捣器组的振捣臂,它的优点是可在仓内短距离推运混凝土,对吊罐卸料的定位要求不高,缺点是走行比较频繁,另外,这种机械的推土刀性能不同于一般推土机,它应保证混凝土在推运过程中不致因发生翻动而产生分离。

振动碾 碾压混凝土施工采用振动碾振动压实。常用的振动碾有轮胎驱动的振动碾、自行式双滚筒振动碾、双联式振动碾及小型振动碾等多种,以自行式滚筒振动碾为佳,其较优的主要机械性能参数为自重 7 t 以上,滚筒静线压为 4 Pa,总的激振力 10 t 以上,振频为 40~50 Hz,振幅为 0.8 mm 左右,碾压速度为 1~2 km/h。小型振动碾大多为手扶式双滚筒振动碾,重量较轻,主要用于靠近模板、场地边角和基岩等处的压实。

(龚青杰)

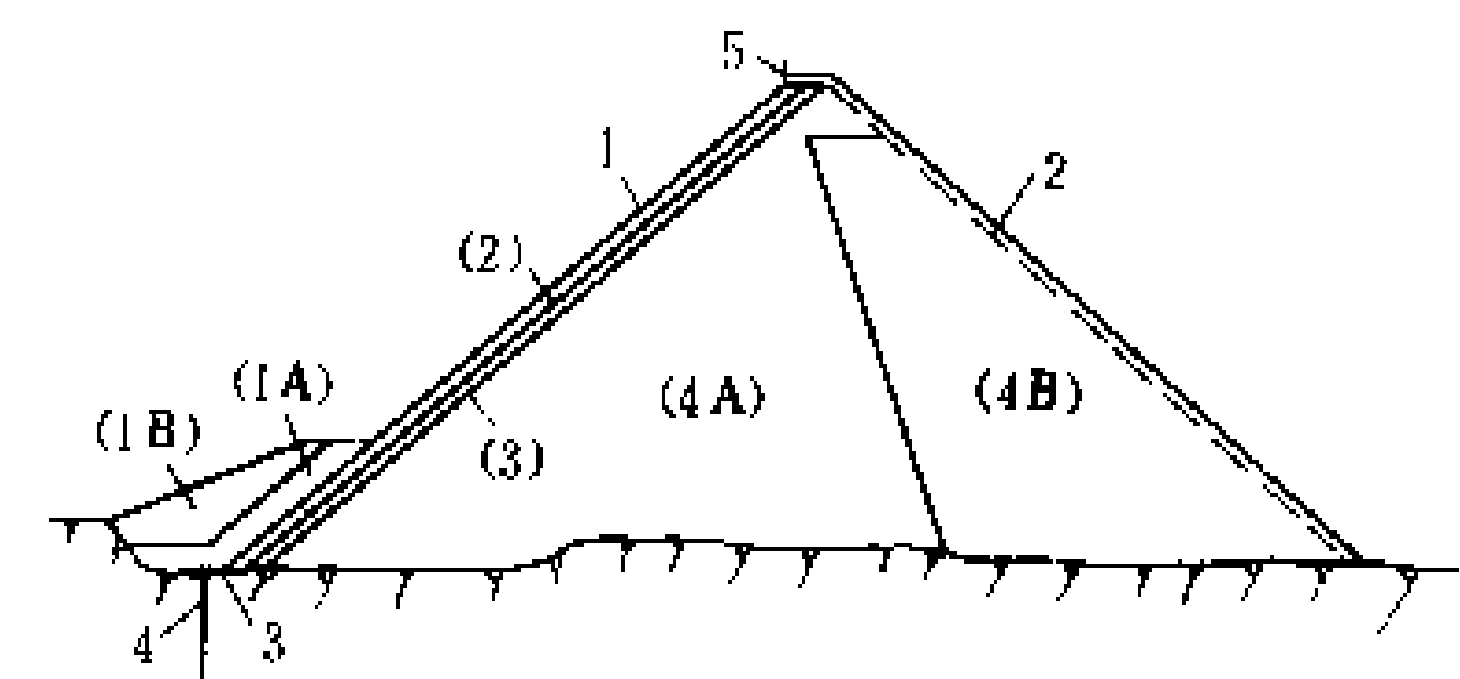
hunningtu mianban duishiba

混凝土面板堆石坝 (concrete face rockfill dam, CFRD)

以堆石为主体材料,上游面用钢筋混凝土面板作防渗体的土石坝。有的以砂卵石为坝主体材料的混凝土面板坝,也常归入此类。这种类型的坝具有坝体断而小,可减少工程量和优化枢纽布置,可简化施工导流和渡汛措施,施工不受或少受气候影响,

各工序间相互干扰较少;有些漏水不致引起严重后果,运行中检查修补比较方便等特点。它是一种工期短、造价低、安全性好的土石坝型。自 20 世纪 60 年代以振动碾压实堆石料,将传统的厚层抛填堆石变成薄层碾压堆石以后,使堆石体密实而较小变形,提高了它的安全性和经济效益,从而得到了迅速发展。到 1991 年底,世界上已建成和在建的 100 m 以上的高混凝土面板堆石坝有 20 座以上,已建成最大坝高 160 m 的巴西的阿里亚 (Foz Do Areia) 坝,在建最大坝高 190 m,设计和施工技术已日趋成熟。中国在 1991 年底前已建成和在建的面板坝有 25 座以上,已建成最大坝高 95 m 的西北口混凝土面板堆石坝,在建最大坝高 178 m,为天生桥一级混凝土面板堆石坝。

坝体构造 坝的断面布置如图所示。由整个坝体起支撑作用以维持其稳定,由坝顶防浪墙、上游混凝土面板、趾板、灌浆帷幕组成完整的挡水防渗系统。有时死水位以下的面板上游面用土料覆盖。坝主体由垫层、过渡层、主堆石组成。垫层由加工过的小石或筛选过的天然砂砾石组成,要求有良好的级配,最大粒径 80~100 mm,小于 5 mm 的细粒含量 25%~40%左右,小于 0.1 mm 的颗粒含量不大于 5%~8%,渗透系数 10^{-3} cm/s 左右,以便使细料能填满粗粒间的空隙,能碾压密实,施工时不分离,也不受含水量影响,在水平和斜坡振动碾压实后,起整平坡面和支承面板的作用。过渡层可采用与主堆石相同的材料,但限制其最大粒径不大于 30 cm,在垫层和主堆石间在渗流和变形方面起过渡作用。主堆石区的上游部分为主要持力体,要求认真选料和碾压密实,一般要求最大粒径不超过 60~80 cm,有一定级配和细料含量。主堆石区的下游部分的变形对面板无大影响,可适当降低要求。超径大石可用吊车或推土机运至下游坡面码放。



混凝土面板堆石坝断面示意图
1 面板; 2—大块石层; 3—趾板; 4 灌浆帷幕; 5 坝顶防浪墙
(1A) —主料; (1B) —任意料护面; (2) —垫层; (3) —过渡层; (4A) 主堆石; (4B) 主堆石,质量及压实程度可低于 (4A) 区

面板和趾板 混凝土面板竖向分缝,以 12~20 m 条块自下而上用滑模连续浇筑,中间设单层双向钢筋。

在靠近岸坡或地形突变部位可在中间增设接缝分成两小块,以更好适应不均匀变形。水平方向可不设伸缩缝,而视施工需要设或不设施工缝。趾板浇筑在坝上游坡脚的基岩面上,是面板与地基的连接部件,主要起防渗作用,其宽度视地基情况按容许水力比降确定。趾板下设铺盖式固结灌浆和帷幕灌浆。

接缝 面板和趾板间的接缝称周边缝,按受力条件属张拉缝,承受三向变形,需严格做好止水结构。现有经验是用底部铜片及中间塑胶片两道止水,缝顶用塑性止水材料封闭,在接缝张开时可在水压力下挤入缝中,保持接缝的止水作用。在周边缝下常设一反滤料的小区,在万一漏水时可截留渗透水中的细颗粒,使缝淤塞而自愈。面板的竖向接缝,靠近岸边的属张拉缝,止水结构与周边缝相同;中间的属受压缝,止水结构可以简化。

参考书目
水利电力部科学技术司,水利水电科学研究院编,
国外混凝土面板堆石坝,北京:水利电力出版社,1988
(蒋国澄)

hunngtlu peiliao
混凝土配料 (concrete batching) 在混凝土制备过程中,按照配合比的要求,将混凝土的各项原材料分别称量配好,以备投料拌和的工序。混凝土原材料通常包括水、水泥、砂、石、掺和料及外加剂等。为了使制成的混凝土能满足设计要求的强度、耐久性和施工要求的和易性,需通过设计和试验,经济合理地定出混凝土的配合比,即单位体积中各组分材料的用量。在配料时,要严格按照确定的配合比(见混凝土质量控制),精确称量出各组分分量。水泥、砂、石、掺和料等一般均以重量计,水及外加剂溶液可按重量折算成体积。称量的偏差不要超过规定的范围。

水灰比是单位体积混凝土中,拌和用水量与水泥及掺和料等胶结材料用量的重量比值。它对混凝土强度性质起着决定性的作用。在混凝土制备中,需采取措施保持砂石骨料含水率的稳定。砂石骨料的含水量和外加剂溶液中的水量,都要计入混凝土用水量。因此,在混凝土拌和过程中,需根据气候条件,经常测定砂石骨料的含水量,以便调整拌和混凝土时的加水量。现代先进的拌和楼,采用自动控制,连续计量和自动记录,用电子秤称量,精度较高,并用中子水分探测器等测定骨料(主要是砂)表面的含水率,自动调整拌和用水量。
(王庭济)

hunngtlu wendu kongzhi
混凝土温度控制 (concrete temperature co-

ntrol) 为防止混凝土由于水化热和外界温度影响产生裂缝,采取的控制与调节措施。混凝土的硬化过程,是水泥发生水化作用的过程。水泥水化伴随发热的化学反应,水化热会使混凝土温度升高,由水化热引起的绝热温升可达三四十摄氏度。混凝土是不良导体,导热系数很小。大体积混凝土内部温度升高,散热很慢,内外温差和温度梯度过大,引起胀缩不均,产生温度应力。当温度应力超过混凝土的抗裂能力时,混凝土将产生裂缝。混凝土浇筑初期,外界温度骤降,也将产生表面裂缝。刚性地基上的混凝土,在降温过程中,由于基础的约束,也会产生拉应力,导致开裂。为防止产生这些裂缝,需采取温度控制措施。

温度裂缝 混凝土结构由于温度影响产生的裂缝,按裂缝深度可分为:①贯穿性裂缝;②深层裂缝;③表面裂缝。贯穿性裂缝会严重破坏结构的整体性和水工建筑物的防渗性能,也影响结构的耐久性,甚至危及结构物的安全。深层裂缝对结构的整体性和防渗性能也有一定影响。这两类裂缝都要尽量避免产生。表面裂缝在一定条件下也会发展成深层裂缝,以至贯穿性裂缝。尤其是发生在大坝上游面和基础部位的表面裂缝,有可能发展成深层或贯穿性裂缝,要尽量避免。

温度控制标准 为防止大体积混凝土产生温度裂缝,一方面要提高混凝土的抗裂能力,另一方面要减小温度应力。提高抗裂能力,主要是提高混凝土的极限拉伸值,相应提高其抗压和抗拉强度,同时要提高施工质量和均匀性,对温度应力,一般以温度差值作为控制标准。

(1) 基础温差。基础约束范围内混凝土最高温度与稳定温度之差。由于温度而产生的应变或应力,随约束条件而不同,基础部分受约束最大,因此容许温差较低。美国(内务部)垦务局(United States Bureau of Reclamation, USBR)规定按块体长度和离基础面的高度规定的容许温差为 $14.9\sim 25.0^{\circ}\text{C}$ 。离基础面越近,浇筑块体越长,容许温差越小。中国SDJ21-78《混凝土重力坝设计规范》规定,当基础混凝土28天龄期的极限拉伸值不低于 0.85×10^{-4} 时,对于施工质量均匀、良好,基础与混凝土的弹性模量相近,短间歇均匀上升的浇筑块,基础容许温差按离基础面高度和浇筑块长度采用 $14\sim 28^{\circ}\text{C}$ 。对于下述情况的基础容许温差需进行论证:①坝块结构尺寸高宽比小于0.5;②在基础约束范围内长期间歇的浇筑块;③基础弹性模量与混凝土弹性模量相差较大。

(2) 上下层温差。老混凝土面(龄期超过28天)上下各 $L/4$ (L 为边长)范围内,上层混凝土最高平均温度与新混凝土开始浇筑时下层实际平均温度之差。当

上层混凝土短间歇均匀上升的浇筑高度大于 $0.5L$ 时,上下层容许温差约为 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$,浇筑块侧面长期暴露时,宜采用较小值。

(3) 内外温差。混凝土块体内部与外部温度之差。苏联规范规定内外温差不大于 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$,中国在1978年以前也作过相同的规定。但对内外温差的含义不明确,解释不一,并且混凝土浇筑后,内部温度、强度、弹模和外界气温均在不断变化,内外温差在施工中实际难于控制。因此,中国在1978年颁发的规范中,不再用内外温差作为控制标准。

(4) 混凝土表面温度骤降。混凝土表面裂缝多发生在浇筑的初期,主要原因是气温骤降。中国规范规定,当日平均气温在2~4天内连续下降 $6\sim 9^{\circ}\text{C}$ 时,未满28天龄期的混凝土的暴露表面可能产生裂缝,因此,在基础混凝土、上游坝面及其他重要部位,应有表面保护措施。严寒地区特别要重视混凝土表面保护,专门研究保护的标准和措施。

温度控制措施 主要是从减少混凝土发热量、降低浇筑温度、加强浇筑块散热和表面保护等方面采取措施,控制温差。

(1) 减少混凝土发热量。在满足设计要求的情况下,尽量减少水泥水化热,主要措施有:①采用水化热低的水泥。②尽量减少水泥用量,加入粉煤灰等掺和料和外加剂。③调整骨料级配,提高粗骨料最大粒径。④采用小坍落度的低流态混凝土。⑤如为混凝土坝,坝体分区采用不同标号的混凝土,并利用混凝土的后期强度。⑥有条件的工程,采用碾压混凝土。

(2) 降低浇筑温度。浇筑温度指混凝土经过平仓振捣后,覆盖上层混凝土前,在 $5\sim 10\text{cm}$ 深处的温度。降低浇筑温度的主要措施有:①充分利用春秋气温较低的季节浇筑混凝土。②用冷水或加冰屑拌和混凝土。③采取骨料堆高、地坑取料、搭盖凉棚、洒水喷雾等措施降低骨料温度,必要时再采取预冷粗骨料的措施。④隔热降温,防止热量倒灌使混凝土温度回升。

(3) 加强浇筑块的散热。混凝土浇筑后,随水化作用的进行,混凝土继续升温,需采取措施加速散热。主要措施有:①分块分层浇筑时分块尺寸适当。②采用低块浇筑,利用表面自然散热,并合理选择间歇时间,层间间歇最好控制在3~7天。③采取结构措施,如设置宽缝,增加散热面。④人工强迫散热,在浇筑块内预埋冷却水管,通水冷却。

(4) 重视表面保护。在气温骤降频繁的季节,对基础混凝土、大坝上游面以及其他重要部位新浇筑的混凝土,进行顶面、侧面的表面保护。表面保护可根据工地具体情况,采用草帘子、苫布、泡沫塑料或其他保温材料。必要时可采用推迟拆模时间或在模板内

hun 混

衬保温材料等办法。有条件时也可考虑采用预制混凝土模板。

(王庭济)

hunngtu yanghu

混凝土养护 (concrete curing) 在一定时间内保持适当的温度和湿度,促使已密实成型的混凝土硬化,达到所需的强度及耐久性等指标的工艺措施。混凝土中的水泥与水混合后立即发生化学反应,称为水化反应。由于水化反应的作用,混凝土拌和物逐渐由半流体状态变为固体状态,这一过程为凝结期。凝结期以后,进入硬化期,水泥的水化反应继续进行。混凝土的硬化过程除与水泥的矿物组成和颗粒粗细有关外,温度和湿度是水泥硬化的必要条件。温度和湿度越高,水化速度越快,凝结硬化也越快。混凝土的强度则随着硬化的龄期而增长。因此,温度、湿度及养护延续的时间是混凝土养护的三个要素。养护的工艺可分为自然养护和热养护两大类。

自然养护 在自然气候条件下,采取浇水润湿、覆盖以及利用太阳能保温等措施养护混凝土。自然养护简便易行,但养护延续时间较长。在工地现浇的混凝土,特别是大体积混凝土,一般均采用自然养护法,具体又可分为浇水覆盖和太阳能养护。①浇水覆盖法,用草袋覆盖混凝土并洒水或喷雾,使混凝土表面经常保持湿润,对水平面也可以贮水覆盖。采用此法需在混凝土浇筑完毕 12~18h 内即开始养护,在炎热干燥条件下还要提前进行。养护延续时间视水泥品种而定,一般不少于 14~21 天,必要时还要延长。②太阳能养护,有直接覆盖式、罩式和窑式几种,利用太阳辐射能以提高养护温度,可缩短养护时间,节省养护费用。直接覆盖式是将塑料薄膜覆盖于混凝土表面,适用于大面积现浇混凝土和大型或非标准构件。罩式采用透明塑料薄膜或玻璃钢太阳能养护罩,适用于生产定型构件的中小型构件厂。窑式采用太阳能养护窑,是一种能连续不间断地进行养护混凝土构件的水平隧道窑。

热养护 利用外界热源加热混凝土以加速水泥水化反应的养护工艺。热养护可分为湿热法和干热法。①湿热养护,采用蒸汽加热混凝土,又可分为常压蒸汽养护和高压蒸汽养护。常压蒸汽养护的温度一般不超过 95℃,可采用各式养护坑或养护窑,经过预养、升温、恒温、降温几个阶段,养护周期为数小时至十余小时。还有的采用热炕台面养护和热拌热模等养护工艺。高压蒸汽养护采用高压蒸汽釜,在高温(200℃左右)高压(10~20 大气压)条件下,经过 10~14 h,即可达到 1~3 个月标准养护下的强度。②干热养护,混凝土不与热介质接触,或用低湿介质直接加热的养护工艺。

全干热养护时,混凝土始终在高温低湿环境中干烘,热源除可采用蒸汽外,还可采用煤气、电,如红外线养护、热风养护、电热养护等,养护周期短,但混凝土失水过多,会降低后期强度。干-湿热养护是先采用干热养护,待混凝土具有一定结构强度时再进入高温高湿介质中继续养护,即可避免失水过多。

在试验室中,为测试混凝土各项性能所制作的试件,须按照规定的养护方法进行养护,称为标准养护。中国 SD105-82《水工混凝土试验规程规定》标准养护室应控制在温度为 20±3℃,相对湿度为 95%以上。

(王庭济)

hunngtu zhibei

混凝土制备 (concrete preparation) 按照设计的配合比,将骨料、胶凝材料、水及其他原材料拌制成混凝土拌和物的工艺过程。通常采用的水泥混凝土,以砂、石为骨料,水泥为胶结材料,为改善混凝土的性能常加入外加剂及掺和料。混凝土制备包括混凝土骨料的开采和加工,水泥、骨料的贮存和运输,混凝土配料及混凝土拌和等主要环节和工序。混凝土骨料可采用天然骨料或人工骨料,前者多采用砂砾石,后者则用石料破碎。混凝土骨料加工是将开采的砂砾石或破碎的石料经过筛分、冲洗,按颗粒粗细进行分级,提供合乎质量要求的骨料。混凝土配料是按确定的配合比(见混凝土质量控制),对各项原材料包括水泥、骨料、水以及掺和料、外加剂等分别称量配好,以供拌和。混凝土拌和则是将经过配料的原材料拌和均匀,制成混凝土拌和物。为满足混凝土温度控制的要求或在低温季节进行混凝土施工,有时还需要对混凝土原材料进行预冷或预热。

混凝土拌和系统 混凝土拌制设施与骨料堆存场地、水泥贮存仓库以及配套的输送、提升和其他装置、预冷预热设施等,构成混凝土拌和系统。混凝土拌制设施有不同的类型。①混凝土拌和站,多用于混凝土工程量不大的中小型水电工程。这种拌和站是将若干拌和机集中在一起进行生产,厂房结构简单,机械设备易于购置,可因地制宜,便于布置,也能同时生产几种标号的混凝土。但一般拌和机容量小,生产效率低,自动化程度不高,劳动强度大,称量不易准确,出料不干净,拌制的混凝土均匀性较差,不易保证混凝土质量。②混凝土拌和楼,多用于大中型水电工程。拌和楼是将进料和贮料、配料称量、拌和及出料都集中在一座楼上,构成一座可自动控制,集中操作的定型的装配式混凝土工厂。一般自上而下分为贮料层、配料层、拌和层及出料层,布局紧凑,占地面积小,生产效率高,混凝土质量容易保证(见图)。③移动式拌和装置,有的国家用

于工程量不大的中小型工程。这是由水泥贮存罐和水泥称量装置、分格的骨料贮存斗和骨料称量装置以及拌和装置等3部分组成的

结构低矮的拌和工厂。每一部分都是自带动力的整套装置,可用牵引车拖带在公路上行驶。全部移动式装置在两天内即可架立连接好。它的优点是机动性好,组装简易,缺点是占地面积大,用人较多。

混凝土拌和系统是混凝土制备的主要设施,也是许多水电工程的重要施工工厂设施。

合理布置混凝土拌和系统,对混凝土工程的施工进度和经济,都有重要作用。混凝土拌和系统的设置也受到许多因素的影响,包括:

①主体工程的布置及混凝土工程量;②混凝土建筑物的浇筑程序及施工进度。③混凝土的浇筑方法及其特点。④混凝土的技术特性及冬夏季施工的特殊要求等。布置混凝土拌和系统时,要综合考虑这些因素,因地制宜,达到地基稳固、布局紧凑、高程适当、运输方便的要求。在独立大型混凝土系统中,拌和楼以1~2座为宜,一般不超过3座。有的大型工程,为适应各部位和各阶段施工的需要,在两岸或不同高程分设拌和系统。

生产能力 混凝土拌和系统的生产能力须满足高峰浇筑强度的需要,并有适当的富裕量。生产能力设置过大,会造成设备积压,效率不能充分发挥;设置过小,会影响混凝土生产、运输和浇筑的强度。因此,生产能力过大或过小都不经济。确定混凝土拌和系统的生产能力,还要考虑高峰期同时浇筑混凝土块体的数量和浇筑仓面的大小、混凝土配合比的品种数目以及浇筑地点的集中程度等。一般可按照高峰月浇筑强度,考虑日不均匀系数,计算混凝土拌和系统的生产力的公式为

$$P = \frac{Q_{y\max}}{nm} K$$

式中 P 为混凝土拌和系统的小时生产能力, m^3/h ; $Q_{y\max}$ 为高峰月混凝土浇筑强度, $m^3/月$; n 为每月工作日, d , 一般取 25 左右; m 为每天工作小时数, h , 一般取 20 左右; K 为浇筑强度的小时不均匀系数,可取 1.5。一座拌和楼的生产率,为楼内各台拌和机生

产率之和。

(王庭济)

hunningtu zhiliang kongzhi

混凝土质量控制 (concrete quality control)

为保证混凝土工程达到设计要求的质量,在施工中对混凝土的质量进行的检验、监督、控制等管理工作。混凝土质量控制工作贯穿于施工全过程,对混凝土的原材料、施工前的准备、施工的各道工序以及硬化后的混凝土,都要进行检查和检验。为控制混凝土的质量,对混凝土的配合比须通过试验选定,并在施工中检查。此外,还要确定混凝土质量评定的标准和方法。

控制的主要内容

(1)原材料的检验。主要项目有:①水泥制造厂的品质试验报告,并须进行复验。检验水泥的标号、凝结时间、体积安定性,必要时还增加稠度、细度、比重和水化热试验。②拌和及养护混凝土用水的水质。③砂石等混凝土骨料的含泥量、有机质含量、砂子和小石的表面含水率、砂子的细度模数、各级粗骨料的超逊径含量及有无活性骨料、黄锈等。④现场加入掺和料的细度、需水量比、烧失量、加入掺和料的标准水泥砂浆强度。⑤外加剂的质量、掺量及配制的溶液浓度。

(2)浇筑仓面及准备工作的检查。主要是:①地基处理须经验收合格,施工工作缝的表面已按要求加工处理。②浇筑仓面的杂物已经清理并冲洗干净,排净积水。③仓面的浇筑平台和平仓、振捣、缓降设备均按施工要求备齐。④钢筋、模板、预埋件及止水设施等均安装固定完毕,符合设计要求。

(3)施工过程各工序的检查和取样检验。主要包括:①混凝土拌和,原材料的配合量、衡器的准确性、拌和时间、混凝土坍落度、含气量等,按规定随机取样,检验混凝土的强度,必要时也要检验抗渗、抗冻标号。②混凝土运输,有无违反规定及发生混凝土拌和物离析、漏浆、严重泌水、温度损失及过多降低坍落度等现象。③混凝土浇筑,是否按规定厚度、次序、方向,分层进行,平仓、振捣、间歇时间等是否符合要求,工作缝处理是否符合规定等。④对于有温度控制要求的混凝土,各项温控措施是否符合要求,混凝土浇筑的分段、分缝、分块高度及浇筑间歇时间等,是否符合设计规定。⑤对碾压混凝土,是否按规定摊铺、碾压,测定容重和及时切缝填缝等。⑥混凝土浇筑完毕,是否及时按要求抹光修整、进行养护,养护时间是否符合规定。

(4)硬化后混凝土质量的检查。主要有:①对混凝土表面进行外观检查,如发现裂缝,需详细记录裂缝的部位、长度、宽度、深度、发现的日期及发展情况。②一般可用超声波、回弹仪等无损试验法,检查其质量。

③必要时,需进行钻孔取样、压水试验或结构荷载试验等,检查混凝土质量。

混凝土配合比的选定和检查 为保证混凝土的质量,工程所用混凝土的配合比须通过试验确定,并在施工过程中进行检查。

(1) 选定配合比的基本原则: ①水灰比是决定混凝土强度和耐久性的主要因素,在满足和易性的条件下,力求单位用水量最少。②根据结构物情况及施工条件,在满足和易性条件下,选择尽可能大的石子最大粒径和最多用量。③选择空隙率较小的级配,同时也要考虑料场的天然级配,尽量减少弃料。④经济合理地选择水泥品种和标号,优先考虑采用优质粉煤灰等掺和料和外加剂。

(2) 选择配合比的主要步骤: ①根据设计要求的强度和耐久性选定水灰比; ②根据施工要求的坍落度和石子最大粒径等选定用水量,再根据水灰比求出水泥用量; ③确定砂率,即砂在砂和石子的实体积中所占的百分率,再计算砂、石用量;或以最多石子用量法先求出石子用量,再求出砂子用量。④通过试验和必要的调整,确定 1m³ 混凝土材料用量和配合比。

(3) 保证强度的计算。保证强度又称施工配制强度。为使混凝土强度保证率满足规定要求,在进行配合比设计时,须使配制强度 (R_p) 高于设计要求的强度 (R_d)。中国水工混凝土采用的计算公式为

$$R_p = \frac{R_d}{1 - tC_v} = KR_d$$

或 $R_p = R_d + t\sigma$

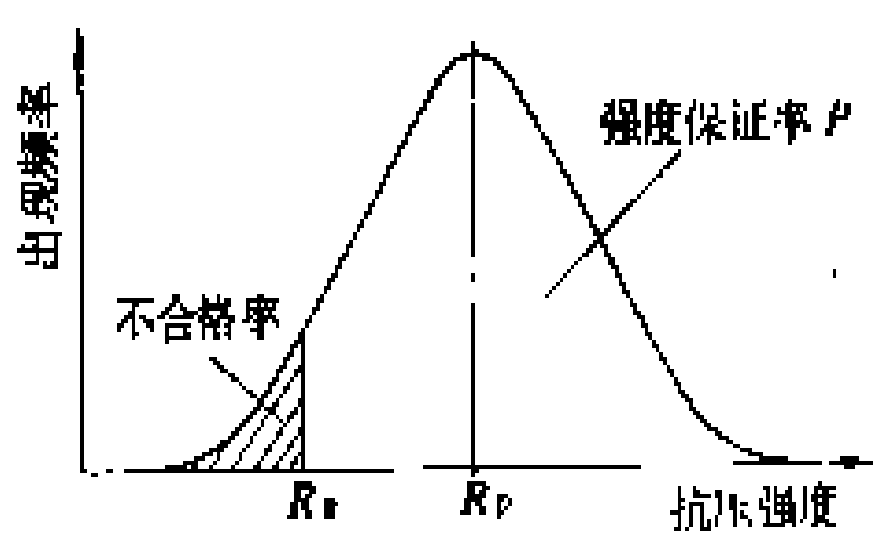
式中 R_p 为配制强度; R_d 为混凝土的设计强度; t 为概率度系数,由给定的保证率决定,可查图表求得; σ 、 C_v 分别为混凝土强度的均方差和离差系数; K 为系数, $K = 1 / (1 - tC_v)$ 。

(4) 配合比的检查。主要是: ①在混凝土拌和配料地点检查各种原材料的配合量,每班不少于 3 次,衡器要随时校正。②水泥、砂、石、掺和料均需以重量计,水及外加剂溶液可按重量折算成体积,称量的偏差需在允许范围内。③在混凝土拌和过程中,根据气候条件定时测定砂、石表面含水率,在降雨时增加测定次数,相应调整加水量。④混凝土在运输、浇筑过程中,不可在中途或仓内加水。

混凝土质量的评定 工程施工中,对混凝土总体的质量,是以施工过程取样成型的若干个试件的试验

结果来评价的。即使是相同的配合比和工艺条件,各个试件的试验结果也不会完全相同,而有一定的随机变异性。如果将各个试体的强度试验结果按大小顺序排列,则各种强度出现次数的频率曲线呈正态分布。为此,就可以采用数理统计方法进行数据处理。通常以强度保证率和均匀性指标,作为评定混凝土质量的标准。

(1) 强度保证率即混凝土强度总体中大于设计强度的概率,用 P 表示,见强度出现频率分布曲线图,空白部分为大于设计强度 (R_d) 的部分,即为强度保证率。图中阴影部分为不合格率,即低于设计强度的概率。各国对强度保证率的要求不一样。中国对水工混凝土规定为:按许可应力法设计的结构,如大坝等,同批试件



混凝土强度出现频率分布曲线

(需大于或等于 30 组) 的统计强度保证率不得小于 80%;按极限状态法设计的钢筋混凝土结构,如厂房等,则不得小于 90%。

(2) 均匀性指标为表示若干试件试验成果波动的离散程度的指标。各国采用的也不一致。有的国家采用均方差,也称标准离差,以 σ 表示。有的国家采用离差系数,以 C_v 表示。计算公式分别为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - R_m)^2}$$

$$C_v = \frac{\sigma}{R_m}$$

式中 R_i 为每组试件的平均极限抗压强度; R_m 为 n 组试件的抗压强度的算术平均值; n 为试件的组数。

中国对水工混凝土抗压强度离差系数 C_v 的评定标准见表。

现场混凝土抗压强度离差系数 C_v 的评定标准

等 级		优 秀	良 好	一 般	较 差
混凝土 标号	<200	<0.15	0.15~0.18	0.19~0.22	>0.22
	≥200	<0.11	0.11~0.14	0.14~0.18	>0.18

混凝土质量控制工作还要有组织上的保证,要建立质量管理体系,包括监督和检验体系,要积极创造条件,推行全面质量管理。

(王庭济)

J

jidun

机墩 (generator pier) 水轮发电机的支承结构。它承受发电机结构传来的全部静和动的荷载,并将其传至厂房下部结构。机墩一般为钢筋混凝土结构,具有足够的强度、刚度和抗振性能。横轴发电机机墩结构比较简单,发电机定子、外壳、轴承支架用地脚螺栓分别锚固于混凝土机座上,机座与厂房下部结构连结为整体。

立轴机组的机墩有圆筒式、框架式、环形梁式、墙梁式、矮墩式等。根据发电机型式及尺寸来设计。

(1)圆筒式(图1)。上端与发电机风罩或发电机层楼板连结,下端固结于下部块体结构上,发电机定子及下机架用地脚螺栓锚固在机墩上,圆筒中间为水轮机井,内有主轴、水轮机顶盖、操作环、接力器等。安装和大修水轮机时,水轮机转轮和顶盖等通过水轮机井吊入吊出。侧面有进入孔出入水轮机井。

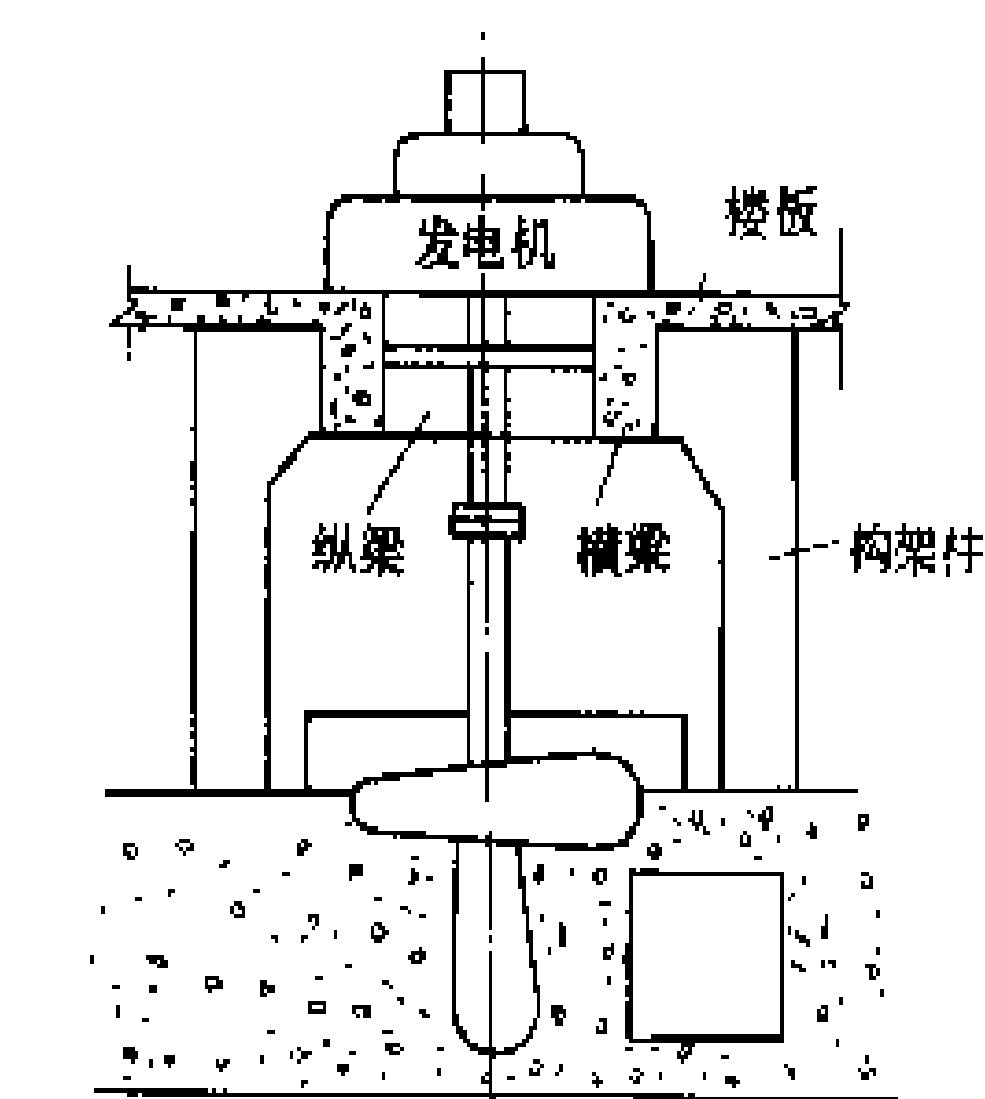


图2 框架式机墩

(2)框架式(图2)。发电机支承于水平大梁和柱所组成的框架上,柱的

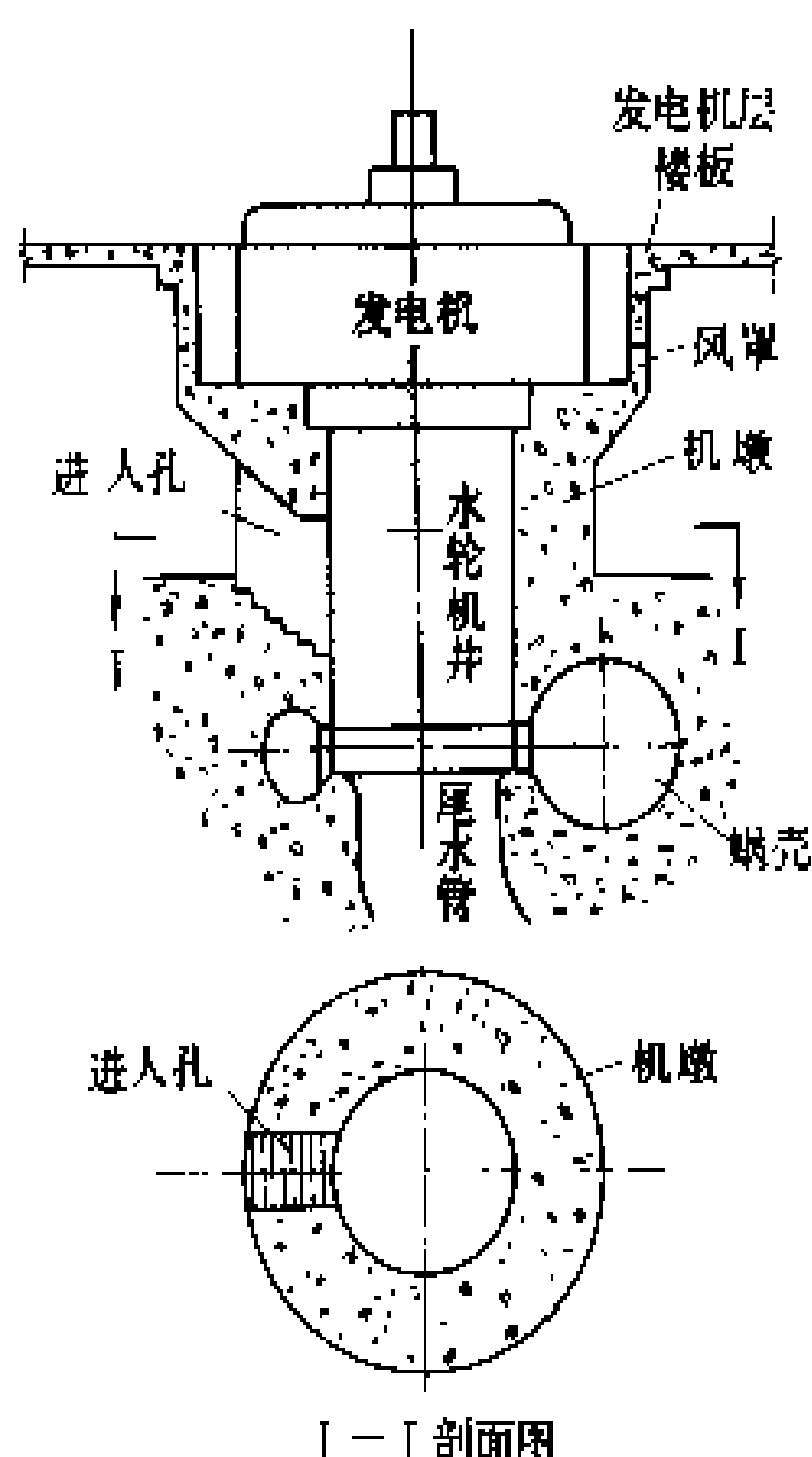


图1 圆筒式机墩

下端固定于块体结构上,有的地下厂房斜撑于岩体上。柱体之间净空尺寸要满足水轮机转轮和顶盖吊装。有的水电站设计成水轮机转轮可从侧面平移搬运,不必吊起发电机转子。

(3)环形梁式。发电机支承于环形圈梁上。圈梁由若干立柱支承,固结于下部块体结构上。

(4)矮墩式(图3)。发电机定子和机架由蜗壳顶部外围混凝土上的支墩承受,支墩之间为发电机通风道。

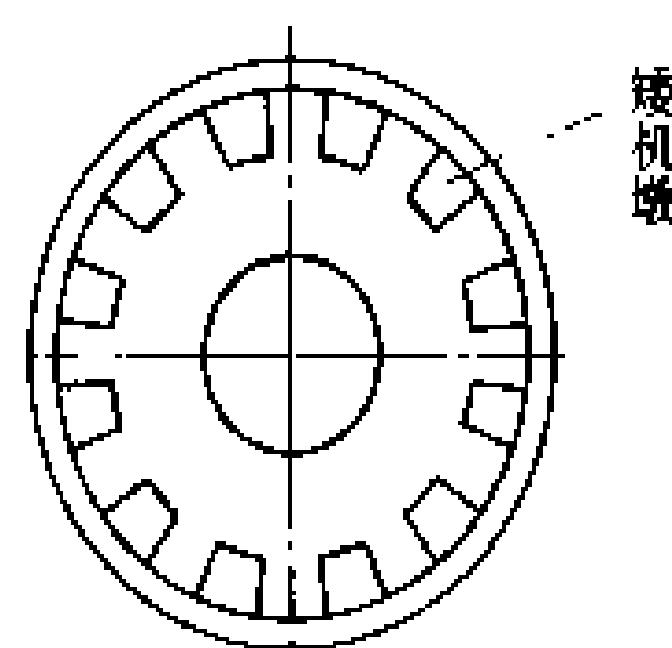
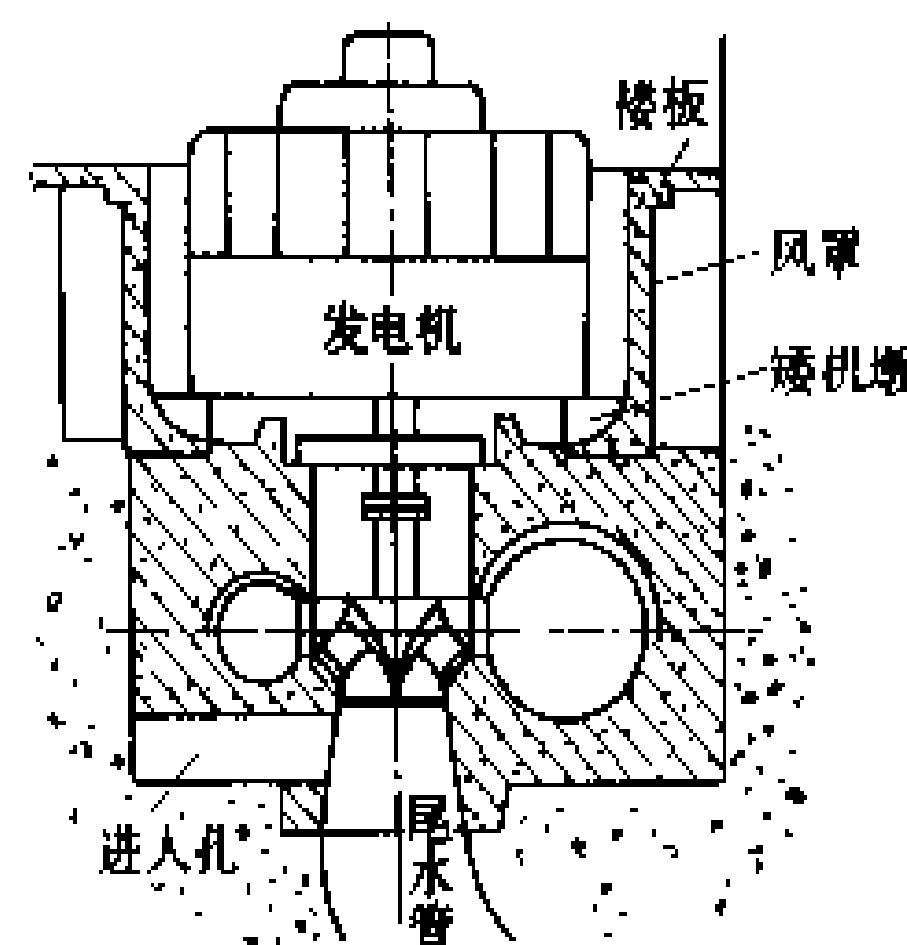


图3 矮墩式机墩

(李必如)

Jisiluo Chaoxi Shiyao Dianzhan

基斯洛潮汐试验电站 (Kislaya - Guba Experimental Tidal Power Station) 位于苏联摩尔曼斯克市以东的白海海滨。装机容量 800 kW,年发电量 230 万 kW·h。全苏水利勘测设计院设计,1967 年开工,1968 年建成发电。

自然条件 电站布置于基斯洛湾与白海相连的缩窄段内,海面宽 50 m,水深 4~5 m,最大潮差 1.3~3.9 m。基斯洛湾水面面积 1.14 km²,平均潮高 2.3 m,涨潮历时 6 h 12 min,通过窄口最大流量达 300 m³/s,最大流速 3 m/s。

建筑物基础为海相覆盖层,厚 5~7 m,由砂贝壳及卵石组成,卵石最大粒径 0.5~1.0 m,含量占 40%。

电站施工 充分利用海运条件,采用预制混凝土构件浮运法施工。主体建筑物为钢筋混凝土整体框格箱,兼起挡水结构和电站厂房的作用。整体框格箱长 18.3 m,宽 36.0 m,高 15.35 m,其内预留了安装 2 台双向式灯泡机组的流道。框架的混凝土底板厚 20 cm,上、下游挡水墙各厚 15 cm。框架内顺水流方向每隔 1.5 m,安 1 道横向隔墙,以增加刚性。框格箱在普里吉卡造船厂预先浇筑并安装发电机组和其他辅助设备,其混凝土量为 1800 m³,连同设备总重 5200 t。采用高标号抗冻混凝土,其抗压强度为 500 kg/cm²,平均配筋量为 130 kg/m³,外侧用玻璃纤维增强的环氧



树脂泡沫隔温板保护，以降低混凝土的温度应力。

坝基覆盖层用小药包爆破松动后，用水上抓斗开挖，共清除覆盖层 25000 m³。在清理后的海底再用抓斗铺上一层 0.5 m 厚的垫层。混凝土预制框格箱，用 6 个浮力各为 400 t 的浮筒，用 2 条 2000 马力的拖船浮运至工地，沉放到预定位置。框格箱底部四周设有高 25 cm 的钢质底刃，以嵌入垫层内。沉放就位后，框格箱内的空间，海水位以下部分，用普通砂料充垫形成压重；在潮汐水位变化范围内的，用拌有重油的砂料充填（每立方米拌重油 320~350 kg）。框格箱两侧用抛石体与两岸相连接，形成连续的挡水前沿。

机组设备 电站装有 2 台双向式灯泡机组，单机容量 400 kW，1 台由苏联设计制造，另 1 台由法国奈尔皮克-阿尔斯通公司设计制造。机组的转轮直径为 3.3 m，转速 72 r/min，通过行星式增速器将发电机转速增加至 600 r/min。电站的金属设备除用有机涂层覆盖外，还采用阴极保护，以防海水侵蚀。

（熊思政）

pliu

急流 (super-critical flow) 弗劳德数

(Froude number) $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} > 1$ 时的明渠水流形态。

陡坡泻槽水流、坝面溢流及山区溪流等，都是常见的明渠急流。

明渠水力学中按 $Fr > 1$ ， $Fr = 1$ 或 $Fr < 1$ 划分为急流、临界流和缓流 3 种流态，其中急流和缓流是相对应的，见图 1。

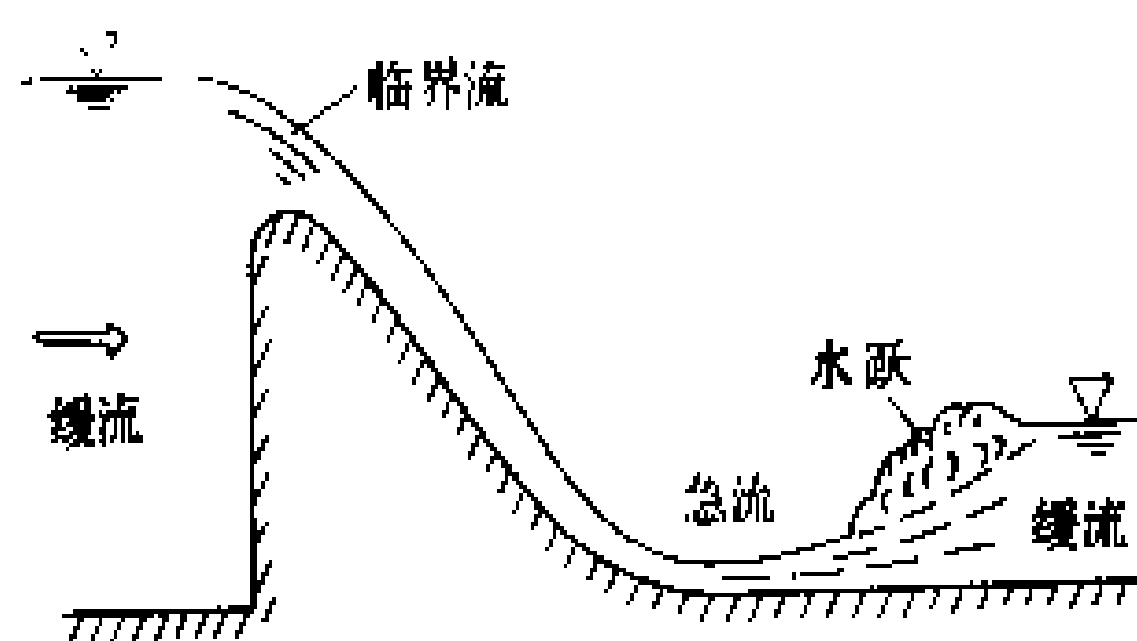


图 1 通过溢流坝的水流

明渠急流特性可由 $Fr > 1$ 的几层含义说明。①急流中，断面平均流速 v 大于静水中的波速 $c = \sqrt{gh}$ (h 为明渠水深， g 为重力加速度)，因此，局部扰动波不能向上游传播，有时在其下游由于扰动叠加形成冲击波（菱形驻波）。② $Fr > 1$ 表明过水断面上单位水体的动能大于其单位势能，水流惯性力的作用大于重力的作用。③明渠急流特性还可用断面比能 $E_s = h \cos \theta + \frac{\alpha v^2}{2g}$ 说明。式中 θ 为渠底坡角； α 为流速分布不均匀系数。断面比能 E_s 是以渠底为基准面的单位水体总能

量。当明渠过水断面的形状、尺寸和通过流量既定时， E_s 仅是水深 h 的函数如图 2。图中 E_s-h 关系曲线以



图 2 断面比能曲线图

E_s 轴和 45°线为渐近线，且有极小值，在极值处 $Fr = 1$ 称临界状态，相应水深称临界水深 h_{cr} 。急流的特征条件是

$$h < h_{cr}, \quad \frac{dE_s}{dh} < 0$$

明渠水流呈均匀流状态时，常用其水面比降 i 大于或小于临界比降 i_{cr} 来判定其是急流还是缓流。临界比降的定义是在断面形状、尺寸、边壁糙度既定条件下，通过一定流量时，形成均匀流所对应的比降。急流的特征条件还可表示为

$$i > i_{cr}$$

明渠中急流到缓流的过渡形式通常以水跃衔接。

（时启燧）

jisuan lixue

计算力学 (computational mechanics)

力学的一个分支，是力学理论与电子计算机技术相结合的一门新兴学科。计算力学的主要分支学科有计算结构力学和计算流体力学。计算结构力学是对结构作离散化处理，用计算机计算应力和位移，进行结构分析；用计算机按某种约束条件和某种搜寻目标选择最佳方案，进行结构优化设计。计算流体力学是用计算机和离散化的数值方法对流体力学问题进行数值计算；对流体力学过程进行数值模拟。计算力学广泛应用于航空、航天、水电、土建、机械、船舶、车辆、核能和海洋等工程领域，成为解决实际力学问题的重要手段。

计算力学的基本原理是对连续体进行离散化处理，用数值方法把力学问题的偏微分方程组转化为代数方程组，用计算机求其数值解。所用数值方法有有限差分法、有限元法、变分法、加权残数法、边界元法、直线法和特征线法等。其中使用最广的是有限差分法和有限元法。有限差分法是将未知函数定义域离散成有限个网格点，用网格点的未知量代替未知函数，用未知量的差商代替偏导数，用差分代数方程代替偏微分方程及其边界条件或初始条件。有限元法是将未知函

数定义域离散成由节点连结的有限个单元,用节点未知量对单元未知函数进行插值,用各单元的插值函数代替未知函数,通过变分原理或加权残数法把偏微分方程组及其边界条件或初始条件化为节点未知量的代数方程组。

计算力学的一个重要研究内容是计算力学的程序设计,即用离散化技术和数值方法编制出计算机软件系统。

(蒋友谅)

ji dian bao hu

继电保护 (relay protection) 检测电气设备或线路不正常运行情况或故障并发出警告信号或有选择地发出跳闸或停机指令的自动化技术及装置。继电保护的作用,一是发出警告信号后,通过运行调整,终止不正常运行情况的发展;二是自动、迅速、有选择性地发生故障的电气设备或线路,从电力系统中切除,终止故障的发展,保证电力系统中无故障部分恢复正常运行。电气设备或线路发生短路故障时,总是伴随有电流、电压、阻抗、电流方向以及电压与电流之间相位等电气量的变化,利用正常运行与故障时这些电气量的区别,可以构成各种原理的继电保护装置。这些装置应能满足可靠性、选择性、灵敏性、速动性的要求。可靠性是指保护装置该动作时应确保动作,不该动作时不误动作;选择性是指首先由故障设备或线路本身的保护装置切除故障,当本身保护装置或断路器拒动时再由邻接设备或线路的保护装置切除故障;灵敏性是指保护装置反应故障的能力;速动性是指保护装置应尽快切除故障。根据不同的保护对象(如发电机、变压器、线路等)和故障类型,配备相应的保护。

继电保护装置分类 继电保护装置可以按其动作原理、构成方式和保护职能的不同,进行分类。

按动作原理分类 根据故障参量的不同,可以构成不同动作原理的保护。例如:利用电流增大的特性,构成过电流保护,利用测量阻抗的减小,构成阻抗保护,也称距离保护;利用电流流向变化的特性,可构成纵联差动保护或方向保护;利用不对称短路故障(单相接地短路,两相短路,两相短路接地)时出现的负序和零序电量,构成负序电流、负序电压、负序方向保护和零序电流、零序电压、零序方向、零序差动保护等等。

按构成方式分类 按照构成方式的不同,可分为由机电型(包括感应型和电磁型)继电器和整流型继电器构成的继电保护装置,晶体管和集成电路构成的晶体管型、集成电路型继电保护装置,微机型继电保护装置。(见电力系统卷感应型继电器、电磁型继电器、整流型继电器、晶体管型继电保护装置、集成电路型继电

保护装置、微机型继电保护装置)

按保护职能分类 按照继电保护装置的职能,可分为主保护、后备保护、辅助保护。主保护是指满足电力系统稳定和设备安全要求,有选择性地快速切除被保护设备和全线路故障的保护;后备保护是指主保护或断路器拒动时,用以切除故障的保护;辅助保护是指补充主保护和后备保护的不足而增设的简单保护。

继电保护配置 装设在水电站内的继电保护有线路继电保护、母线继电保护、主变压器继电保护、水轮发电机继电保护、抽水蓄能电动发电机继电保护以及厂用电继电保护等。

线路继电保护 高压输电线路的继电保护应根据电力系统的整体要求配置,一般按下述情况分别考虑。

(1)对于中性点非直接接地电力网的线路,装设电流保护(包括电流电压保护、方向保护)、距离保护、导引线保护等,对于并列运行的平行线路,可装设横联差动保护(横联方向差动保护或电流平衡保护)。

(2)中性点直接接地电力网的 110 kV 线路,装设距离保护、电流保护或导引线保护,对于平行线可装设相间横联差动及零序横联差动保护;对 220kV 线路,装设线路纵联保护(载波保护、导引线保护、直接跳闸式保护或行波保护)、距离保护、电流保护(包括零序电流或电流电压保护、方向保护),对于并列运行的平行线路,可装设横联差动保护(横联方向差动保护或电流平衡保护);对于 330~500 kV 及以上线路装设两套互为独立的主保护,并配以其他保护。(见电力系统卷线路继电保护配置、电流保护、距离保护、线路纵联保护)

母线继电保护 为减小母线故障时的停电范围,对高压母线装设专用母线继电保护。

(1)专用母线继电保护的基本要求是:①双母线接线并联运行时,应保证跳开母联断路器;②具有防止装置误动和电流回路断线引起误动的闭锁装置;③母线充电时能快速切除母线上的故障;④母线保护动作后,对装有纵联保护且不带分支的线路,能促进线路对侧全线速动保护跳闸;⑤满足邻接设备或线路对母线保护的要求;⑥保护区外短路故障,不应误动作。

(2)根据上述要求,对不同接线方式的母线,按其电压等级及在电力系统的位置,从下列母线保护方式中选取。①差动电流母线保护。其差动回路按环流电流原理构成。当母线上所有进出线的二次电流都包括在差动保护差电流回路中时,称为完全电流差动母线保护,可用于各种电压等级的母线;当只将母线上有电源的进出线的二次电流接入差动保护差电流回路中时,称为不完全电流母线差动保护,这种保护方式水电站使用不多。②电流相位比较式母线保护。将单一母线上

所有进出线的二次电流，经电压形成回路变成电压以实现保护区内外短路故障时电流相位的比较，这种保护称为电流比相式母线保护。利用比较双母线联络断路器电流与完全电流差动总差电流相位的原理构成的母线保护，称为母联电流相位差动式母线保护。③其余诸如电压差动母线保护、带制动特性的母线保护、相位比较比例差动母线保护等。

对 220~500 kV 母线，装设能快速有选择地切除故障的母线保护装置。对 1 个半断路器接线，每组母线可装设两套母线保护装置。

(3) 对连接于母线上的变压器或线路发生故障并伴随断路器拒动，装设断路器失灵保护，由保护装置出口元件、断路器拒动检定元件及时限元件构成，动作后将与故障元件接于同一母线上所有断路器断开。

主变压器继电保护 保护范围除包括升压变压器或联络变压器本身外，尚应包括其套管及引出线，主要装设反应内部短路故障的纵联差动保护、反应短路故障的过电流保护、反应中性点直接接地电力网中的接地短路故障的零序电流（电压）保护、反应变压器短路故障的气体保护以及过励磁保护、过负荷保护、温度保护等。

(1) 纵联差动保护除了要防止因外部短路故障的不平衡电流引起的误动作外，其主要特点要防止变压器励磁涌流引起的误动作。当投入空载变压器或外部短路故障切除后电压恢复时，因铁芯饱和而出现的数值很大的励磁电流，称为变压器励磁涌流。其主要特点是：①数值最大可达额定电流的 6~8 倍；②经谐波分析，在高次谐波中二次谐波分量为重，可达基波分量的 20% 以上；③波形对时间轴偏移，出现波形间断角。根据励磁涌流谐波特性，可采用二次谐波制动式或判别波形间断角的差动保护；带速饱和变流器的比例制动式差动保护也是保护方式之一，但其避越励磁涌流的性能不如前者；电压在 330kV 及以上的，可装设双重差动保护。

(2) 过电流保护可用低电压起动的过电流保护、复合电压（负序和正序电压）起动的过电流保护、负序电流和单相式低电压起动的过电流保护、阻抗保护。对于三绕组多侧电源的变压器，要考虑方向保护。

(3) 零序电流（电压）保护与变压器接地方式及其绝缘等级有关，一般装设多段式（带方向或不带方向）零序电流（电压）保护或变压器外壳接地保护。对于自耦变压器，当纵联差动保护对内部单相接地短路故障的灵敏性不能满足要求时，还装设零序差动保护。

(4) 气体保护（瓦斯保护）。变压器内部短路故障时，其绝缘质分解出大量气体，严重时产生外泄的高速油流，以此做成判别内部短路故障的气体保护。保护装

置由两部分组成，一是反应油位的高低，当内部积聚的气体超过规定容积时，发出信号；一是反应外泄油速，当内部短路故障时，外泄油速超过规定值时，发出跳闸指令。

(5) 过励磁保护。变压器工作磁通密度 B 与电压频率比 U/f 成比例，对于大容量变压器，因其工作磁通密度接近饱和磁通密度，在过电压（或频率降低）的作用下使其铁芯饱和后，导致励磁电流急剧增大，引起变压器严重过热，当过励磁倍数超过规定值时，发出信号或跳闸指令。

(6) 过负荷保护。包括对称过负荷和不对称过负荷保护装置，延时动作于信号。

厂用电继电保护 包括厂用变压器、厂用高压馈线、厂用机械动力设备（主要是各类电动机）等的保护。

(1) 对于厂用变压器的相间短路故障，装设电流速断和带时限过电流保护，当容量较大（例如 2000 kV·A 及以上）而电流速断保护的灵敏性不符合要求时，装设纵联差动保护；低压侧直接接地的接地短路故障，当相间短路的过电流保护的灵敏性不符合要求时，可装设接地保护；对容量较大的室内油浸式厂用变压器（例如 400 kV·A 及以上），装设气体保护。

(2) 厂用高压馈线一般装设两段过电流保护，一段不带时限的电流速断保护，二段带时限的过电流保护。

(3) 水电站厂用机械多采用异步电动机，而且以 380V 低压电动机为主，这类电动机一般装设定子绕组单相接地保护、过负荷保护、低电压保护，一般不装设过电流保护。对于高压（例如 6、10kV）异步电动机，还对其相间短路故障装设过电流保护或纵联差动保护（例如容量在 2000 kW 及以上或 2000 kW 以下而电流速断灵敏性不符合要求者）。

（贺至刚）

Jia'nada shuinneng ziyuan

加拿大水能资源 (hydropower resources of Canada)

据英国《国际水力发电与坝工建设》1991 年手册和北美专刊统计，加拿大河川水能资源理论蕴藏量 12398 亿 kW·h/a，技术可开发水电站装机容量为 162804 MW，经济可开发资源为 5930 亿 kW·h/a。而据 1993 年手册统计，技术可开发资源为 7185 亿 kW·h/a。

加拿大国土面积 998 万 km²，东濒大西洋，西临太平洋，北为北冰洋，南与美国为邻。东部有阿巴拉契亚山脉和加拿大地盾形成的拉布拉多高原。西部有落基山脉、喀斯喀特山脉和海岸山脉。以这些山脉为发源地，以大西洋、太平洋、北冰洋和哈得孙湾为出口形成了水能资源丰富的河川。其中有流入大西洋的圣劳伦

斯水系中的马尼夸根河和乌塔尔德河；流入哈得孙湾的卡涅皮斯考河、拉格朗德河、伊斯特门河、大贝莱因河、布鲁内水系和纳尔逊河；流入太平洋的弗雷泽河和哥伦比亚河的上游段；流入北冰洋的马更些河等。降水量以东部和西部较多而中部较少。西部太平洋沿岸地

区年降水量高达 2400 mm，东部大西洋沿岸地区年降水量为 1000~1400 mm，中部为 250~500 mm。上述地形和降水等自然条件使水能资源分布很不均匀，60%以上的可开发资源集中在魁北克省和不列颠哥伦比亚省，分布见表。

加拿大分省（地区）可开发水能资源分布表

省 别（地区）	可开发水电站装机容量		1991 年已开发装机容量		1991 年水电年发电量	
	（MW）	（ % ）	（MW）	开 发 率（%）	（亿 kW·h）	（ % ）
全 国	162804	100.0	60271	37.0	3053	100.0
魁北克省	68118	41.8	28093	41.2	1386	45.4
不列颠哥伦比亚省	27392	16.8	10849	39.6	602	19.7
安大略省	12045	7.4	7191	59.7	377	12.3
纽芬兰省	11305	6.9	6650	58.8	354	11.6
育空地区	10607	6.5	77	0.7	4	0.1
艾伯塔省	10496	6.5	734	7.0	20	0.7
马尼托巴省	10011	6.2	4498	44.9	226	7.4
西北地区	9246	5.7	50	0.5	2	0.1
萨斯喀彻温省	1765	1.1	836	47.4	42	1.4
新不伦瑞克省	1343	0.8	903	67.2	30	1.0
新斯科舍省	476	0.3	390	81.9	10	0.3

加拿大用电负荷中心主要在南部，因此南部水能资源首先得到开发，接着逐步移向北部。在水电建设中，加拿大重视梯级开发和跨流域引水开发，重视在河流上游建调节性能好的水库。加拿大电力系统中以水电站为主，在 1950 年水电比重为 96.4%，到 1991 年仍占 61.9%。到 1991 年底水电装机容量为 60271 MW，为全国可开发资源的 37.0%。开发较充分的河流有拉格朗德河、纳尔逊河、马尼夸根河、哈密尔顿河和哥伦比亚河上游。1991 年水电发电量为 3053 亿 kW·h，为经济可开发资源的 51.5%。

加拿大海岸线长且曲折，太平洋及大西洋沿岸多峡湾岛屿，潮汐能资源丰富。东海岸芬地湾的最大潮差达 19.6 m，是世界最大潮差。全国潮汐能可开发资源有 2550 亿 kW·h/a，占世界首位。

（高又生）

jianxiu rongliang

检修容量（repairing capacity） 见电力电量平衡。

jianxiu zhamen

检修闸门（bulkhead gate） 为检修泄（引）水建筑物及其上的有关设施而设置的闸门。它一般在预定的检修时间内使用，故仅需在静水条件下启闭操作。在多孔口设置检修闸门时，考虑其分批进行检

修的可能，可以仅设置少数公用的检修闸门。为适应多孔合用一扇门的要求，一般选用移动式启闭机操作，并要求能将闸门整扇或分段吊出孔口，同时，还应注意闸门槽的安装和施工质量。

类型 有叠梁、拱形闸门、浮筒闸门和平面闸门等多种型式。叠梁常用于小型水利水电工程，其漏水量较大。拱形闸门适用于大跨度露顶式孔口，近年也有用于潜没式孔口。浮筒闸门适用于大跨度多孔口的溢洪道和水闸上，可利用水库中的机动船艇作为闸门的移运设备，比较经济方便，但闸门的就位拉紧和沉浮等操纵，比较复杂费时，门的自重大，门体内充、排水设备复杂。平面闸门用作检修闸门最为普遍，尤以平面滑动闸门为多，因其支承构造简单，便于制造、安装和运行。

启闭条件 为使检修闸门能在平压情况下操作，往往需在门上设充水阀或用其他充水方式。为安全计，检修闸门的启门力计算，要考虑一定的水位差。

（沈德民）

Jiangxia Chaoxi Dianzhan

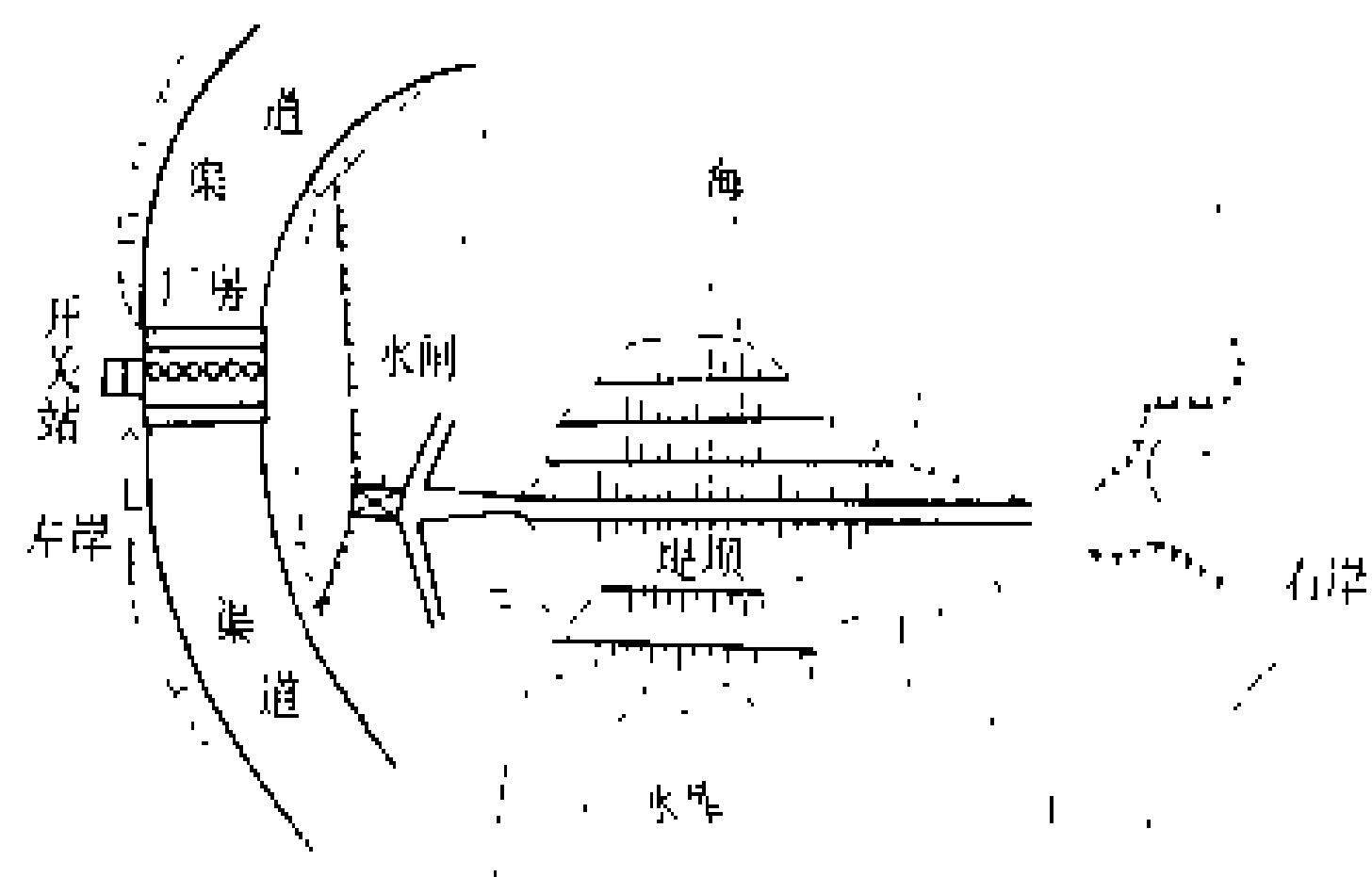
江厦潮汐电站（Jiangxia Tidal Power Station） 中国利用潮汐能发电的一个试验电站。位于浙江省温岭县乐清湾北端的江厦港上。电站设计装机容量 3900 kW，年发电量约 1000 万 kW·h。1986 年建成发电。已装 5 台双向灯泡贯流式潮汐机组，共



3200 kW, 留一个基坑做为潮汐发电新技术试验场地。

江夏港潮汐为半日潮, 平均潮差 5.08 m, 最大潮差 8.39 m, 与著名的钱塘江最大潮差相当, 最小潮差 1.53 m。库内发电正常蓄水位 2.18 m, 设计高潮位 4.76 m。最大工作水头 5.5 m, 最小水头 1.5 m。正常蓄水位时, 库面约 2 km²。电站采用单库双向发电的开发方式。

枢纽布置 电站枢纽由堤坝, 泄水闸, 厂房和开关站等建筑物组成, 见图。



江夏潮汐电站枢纽简图

堤坝为海涂泥心墙堆石坝, 全长 670 m, 坝基为厚达 46 m 的海涂淤泥质软基。最大坝高 15.5 m, 坝顶宽 5.5 m, 深港部分最大坝基宽 180 m。5 孔平底泄水闸, 位于堤坝左端凝灰岩基上, 每孔净宽 3 m, 采用液压启闭机启闭。发电厂房位于泄水闸左侧岩基上, 全长 56.9 m, 宽 25 m, 高 25.2 m, 分 6 个机组段, 每个长 7.5 m, 其余为安装间, 屋内开关站等。厂房内设起重量为 15/3 t 桥式起重机 1 台。开关站紧靠厂房左侧。主接线采用“三机一变”的扩大单元接线, 用 35 kV 电压出线与温岭电力系统相连。厂房与上、下游的水库和海分别以底宽 45 m 的渠道连通。

潮汐发电机组 电站安装 5 台灯泡式贯流机组。转桨式水轮机转轮直径 2.5 m, 采用“S”形叶型。1 号机组 500 kW, 2 号机组 600 kW。这两台机组的水轮机用行星齿轮与发电机相连, 水轮机转速为 118 r/min, 发电机的转速经过增速后为 500 r/min。发电机采用双轴承卧式布置, 强迫轴向风冷。3~5 号机组的水轮机与发电机直接连接, 每台机组容量为 700 kW, 转速为 125 r/min, 采用强迫轴向通风, 热风由机壳外海水冷却。机组可以有正、反向发电和正、反向泄水 4 种运行工况。一天两潮, 机组 4 次开机发电, 4 次停机。由于开、停机频繁, 发电机出线侧和主变压器高压侧分别采用磁吹式空气断路器和六氟化硫断路器。机组流道为了防止海水腐蚀和海生物的污着, 采用了涂料和阴极保护, 同时还采用电解海水液定期放入机组的流道, 综

合防污效果很好。

运行效益 江夏潮汐电站从 1980 年 5 月第一台机组发电, 至 1989 年 5 月, 已连续运行 9 年, 运行正常。除发电外, 预定的科学试验内容, 如潮汐能的特点、海工建筑物技术、潮汐机组的研制、防污防腐技术及综合利用等都已完成。为了进行库区综合利用, 发电库容以外的库区, 围垦了 4000 余亩土地, 种植了水稻、小麦、甘蔗、甘桔, 库区养殖牡蛎、花蚶、对虾等海产品, 使电站的综合利用效益有了很好的发展。

(沙锡林)

jiangshui

降水 (precipitation) 大气中的气态水, 在一定的条件下辐合上升, 到高空遇冷凝结而降落到地表的液态和固态水, 如雨、雪、雹等。在某一时段内聚积在水平面上未经蒸发、渗透、流失的降水(固态降水折算成液态水)深度称降水量, 以 mm 计。

降水是地表水、地下水的来源, 与国计民生关系密切。在江河流域规划治理、水利水电工程建设及防汛抗旱等各项工作中, 降水量都是重要的基础资料。雨量站和气象台(站)均观测降水。有的水文站和水位站也兼测降水。截止到 1986 年底, 中国水文部门观测降水的站点共有 20266 个(台湾省未计)。中国近代观测降水最早的有连续记载的雨量站是北京站, 建于 1841 年, 其次是上海的徐家汇站, 1873 年起观测。

中国测记降水量的标准时制是以北京时间 8 时为日分界, 从本日 8 时至次日 8 时的降水量作为本日的降水量。观测降水量常用的仪器有雨量器和自记雨量计。中国气象部门规定, 24 小时内雨量不到 10 mm 为小雨, 10~24.9 mm 为中雨, 25~49.9 mm 为大雨, 大于 50 mm 为暴雨。

一个地区的降水量的多少与其距水汽源地的远近、天气系统(如冷锋、低槽、低涡、切变线及热带风暴等)活动情况和地形条件等有关。世界陆面降水分布很不均匀, 赤道地带和东南亚季风区降水量最多, 中纬度地区次之, 副热带沙漠地区和两极地区降水很少。印度喜马拉雅山南坡的乞拉朋齐年平均降水量为 11000 mm, 是世界降水量最多的地方。中国多年平均降水量为 648 mm, 小于世界陆面平均年降水量(800 mm)。中国幅员辽阔, 地形复杂, 年降水量在地区上分布极不均匀。降水量从东南沿海向西北内陆逐渐减少, 山地多于平原, 迎风坡多于背风坡。浙、闽、粤、台各省年平均降水量一般大于 1500 mm, 台湾基隆东南的火烧寮实测年平均降水量为 6569 mm, 实测最大年降水量达 8408 mm(1942 年), 是中国年降水量最大的地方。长江中下游一般为 1200~1400 mm, 淮河流域 700~

1400 mm, 黄河及海河流域 500~700 mm, 东北 350~700 mm, 西南云贵高原一般为 700 mm 以上, 西北内陆绝大部分干旱少雨, 塔里木盆地和青海柴达木盆地不足 25 mm, 吐鲁番盆地托克逊站 7.1 mm, 1968 年降水量仅 0.5 mm, 是中国年降水量最少的记录。中国处于季风地带, 大部分地区年降水量都集中在夏季, 6~8 月的降水量大多占年降水量的 40% 以上, 北方一般大于 60%~70%。

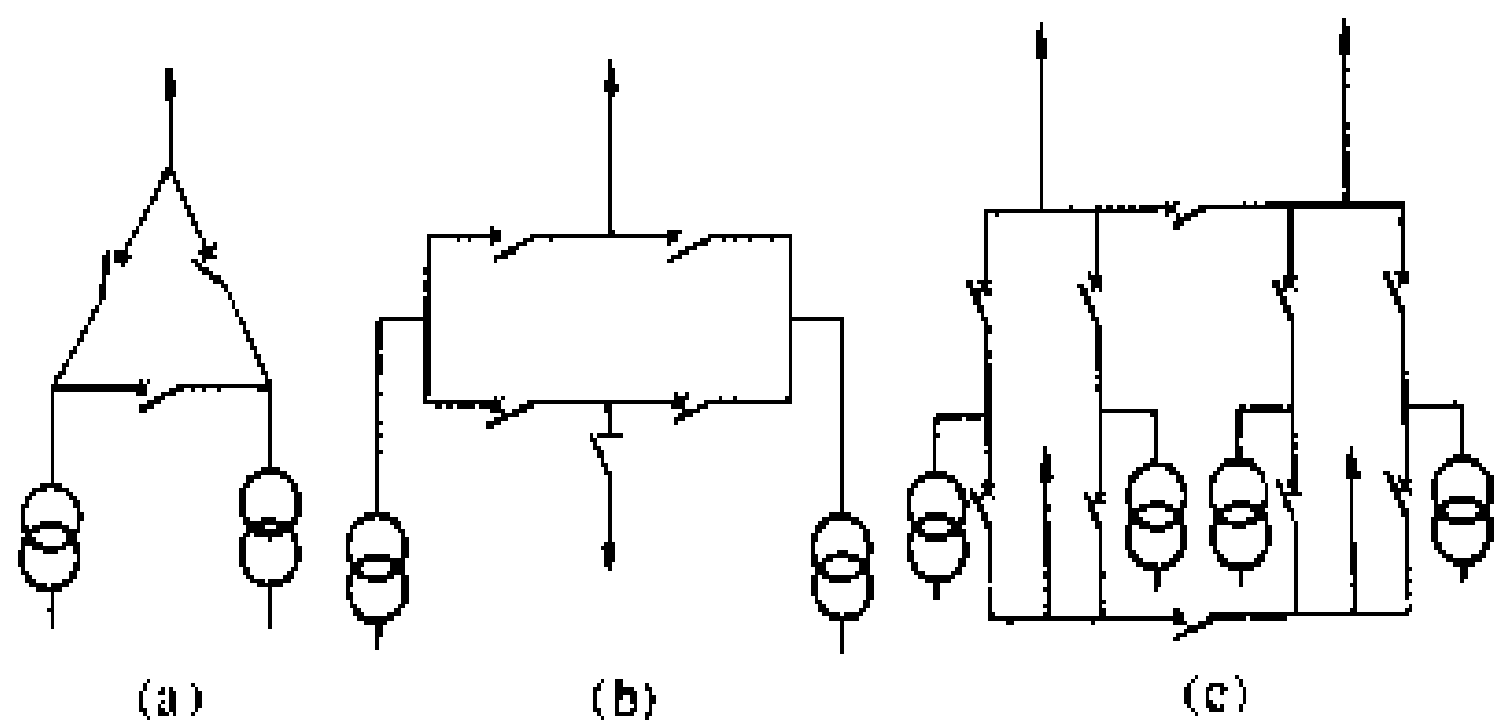
(夏方佐)

jiiaoxing jiaxian

角形接线 (angle-type connection scheme)

各断路器互相连接而成闭合的环形电路, 也称环形接线。在每两台断路器之间引出一条回路, 而在每一进、出线回路中不装设断路器。角形接线既实现了双重连接的原则, 使每一回路有两台断路器, 具有双断路器的功能, 又使断路器数量等于进、出线回路数, 具有设备少、投资省的优点。并且在角数不多的情况下, 具有较高的可靠性和灵活性。由两个或以上角形接线的各一个角或两个角相互连接在一起, 形成单联或双联角形接线, 也属于角形接线方式。

常用的有三角形接线、四角形接线、五角形接线以及六角形接线。当进、出线回路数较多时, 也有采用: ①单联三或四角形接线; ②双联三或四角形接线, 见图(c)。若两个三或四角形之间只有一台断路器连接时, 则变成单联三或四角形接线。



角形接线图

(a) 三角形接线; (b) 四角形接线; (c) 双联四角形接线

角形接线的优点是: ①接线成闭合环形, 没有母线, 充分利用每一回路双断路器的特点, 任何一台断路器检修, 不影响回路的连续供电, 可靠性高, 操作方便、灵活。②设备少, 投资省, 占地面积小, 适用于狭窄的场地。③正常运行操作由断路器进行, 易于实现自动化、远动化。缺点是: ①任一组断路器检修都成开环运行, 若此时其他回路或设备发生故障, 将造成二个回路停电。对单元接线的调峰电站, 为避免经常开环运行的缺点, 可增设发电机出口断路器以适应机组起停频繁操作而保持高压侧接线闭环运行的要求, 但这样将增加

主变压器空载损耗和断路器的投资。②每一进出线回路都连接两组断路器(双联或单联角形接线中的个别回路连接三组断路器), 每一组断路器又连接两个回路, 使继电保护和控制回路比较复杂, 断路器的调试也较麻烦, 并需满足并联开断的要求。③不便于过渡和扩建。

中国于 20 世纪 50~60 年代即在 110~220 kV 开关站采用了角形接线, 到了 70~80 年代推广至 330~500 kV 开关站。一般认为六角形以下的角形接线比较简单, 是可行的接线方式。加拿大的波太基山 (Portage Mountain) 水电站在 138 kV 电压侧就用了八角形接线, 还在拉格朗德二级水电站(单机容量 333 MW, 总装机容量 5328 MW), 每两台机组成一个扩大单元, 8 个扩大单元与 4 回 735kV 线路组成双联六角形接线。

(潘天缘)

jiage hongshuiwei

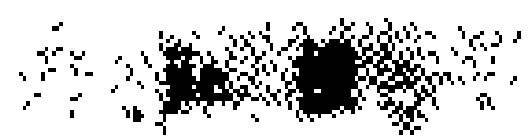
校核洪水位 (water level for check flood)

水库遇到大坝的校核洪水时坝前允许达到的最高库水位。该水位也是设计考虑最不利水文条件下的最高库水位。而水库遇到大坝设计洪水时坝前允许达到的最高库水位称为设计洪水位。校核洪水位以下的库容称为总库容, 而总库容是划分水电站等级的依据。校核洪水位与汛期限制水位之间的库容称为调洪库容, 其中包括防洪高水位与汛期限制水位之间的防洪库容。校核洪水位和设计洪水位又是水电站水工建筑物安全设计的依据。

当库水位超过汛期限制水位(没有防洪任务水电站)或超过防洪高水位(有防洪任务水电站)且入库流量大于泄水建筑物能泄出的流量时, 部分水量将蓄入水库, 库水位将升高。当遇设计洪水库水位升高到设计洪水过程线中入库流量等于泄水建筑物的泄洪能力时为止, 该库水位为设计洪水位。当遇校核洪水, 库水位同样升高到入库流量等于泄水建筑物能泄出的流量时为止, 该库水位为校核洪水位。

校核洪水位和设计洪水位是在水电站设计阶段选定, 一般是在汛期限制水位和防洪高水位已经选定的条件下进行。这两个水位的选择比较简单, 当采用的泄水建筑物泄水能力较大时这两个水位将较低, 坝体工程量较少。反之, 这两个水位较高, 坝体工程量较多。所以这两个水位选择一般是根据泄水建筑物和坝体所需投资最少的原则选定, 有时据水库不淹没库区某一对对象确定这两个水位, 同时据此确定泄水建筑物的泄水能力。

(欧阳华)



jiechu guanjiang

接触灌浆 (contact grouting) 在岩石上或钢板结构物四周浇筑混凝土时,混凝土干缩后,对混凝土与岩石或钢板之间形成缝面的灌浆。

接触灌浆的主要作用是填充缝面,增加粘着力和加强接触面间的密实性,防止漏水。

在岩石地基上建造混凝土坝,当混凝土体积收缩后,两者之间会产生缝面,对于这类缝面需要进行接触灌浆。

在岩石比较平缓部位,接触灌浆常与岩石中的帷幕灌浆结合进行,将坝体混凝土与岩石的接触部位,做为一个灌浆段,段长不超过 2 m,单独进行灌浆。

在坝肩岩石边坡陡于 45°的部位,接触灌浆的设计和灌浆方法与接缝灌浆类似,有的采用浇筑混凝土后再钻孔的方法,有的采用预埋灌浆盒或其他方法,主要是需在接触面上形成出浆点或出浆线,也设置有进浆管、回浆管、排气管。待混凝土达到设计规定的温度后,即行灌浆。

在钢管或钢板结构物周围浇筑混凝土,当混凝土体积收缩后,两者间同样地会产生缝面,对此缝面也要进行灌浆。其施工程序为:①在钢板上锤击检查,画出脱空区。②视脱空区面积的大小,确定孔数,布置孔位。每个脱空区至少布置两个孔,其中一个为灌浆孔,靠近脱空区的底部,另一个为排气孔,位于脱空区的顶部。③钻孔。④灌浆。

灌浆施工自下端开始,逐渐向上。为了防止浆液沉积析水,致使浆体凝固后仍留有空隙,故采用浓的水泥浆灌注。

(孙 钊)

jiefeng guanjiang

接缝灌浆 (joint grouting) 填充混凝土建筑物结构缝的灌浆。如混凝土坝纵缝和横缝的灌浆。

接缝灌浆的主要作用是提高结构的整体性和连续性,便于有效地传递应力。

接缝灌浆一般是通过特设的灌浆管路系统进行的。灌浆系统采用预埋方式,在浇筑块间的缝面上设置排气槽,并预埋出浆盒;在浇筑块内预埋进浆管、回浆管、灌浆支管、排气管以及止浆片等。另外也有采用塑料管拔管技术措施,在缝面上形成出浆线,用以代替出浆盒,其他管路系统仍然埋设。两者相比,后者的灌浆效果好。

只有当灌缝层混凝土及其上的压重层混凝土的温度均达到设计规定值时,方允许进行灌浆。

灌浆施工按自下而上的顺序分层进行。混凝土重力坝的灌缝层高度常采用 9~12 m,缝面面积为 200~

300 m²。

灌浆前需进行通水检查,以了解灌浆管路和缝面通畅情况,发现问题,进行处理,直至合乎要求时止,例如,排气管若不出水,则需补打排气孔,直至能将缝面空气排出有水返出时止。

在开始灌浆之前,灌浆管路和灌缝缝面尚需充水浸泡 24 h。有时还需进行一次预灌性压水检查。

灌浆采用水泥浆,水灰比一般分为 3、1、0.6 三级,先稀后浓进行灌注。当最浓级浆液灌注一定时间,排气管出浆也达到此级浓度,且排气管口处压力达到设计规定值时,就可结束。达不到上述标准,在顺灌结束后,应立即用最浓级浆液由排气管处进行倒灌。

灌浆用的水泥应有足够的细度,水泥标号不低于 525 号,通过 4900 孔/cm² 标准筛的筛余量不宜大于 5%;接缝张开度小于 0.5 mm 时,其细度要求通过 6400 孔/cm² 标准筛的筛余量不大于 2%。

接缝灌浆质量通常是根据对施工记录资料的检查和分析、钻孔取样、压水试验以及缝面凿槽检查等多项工作综合评定。

(孙 钊)

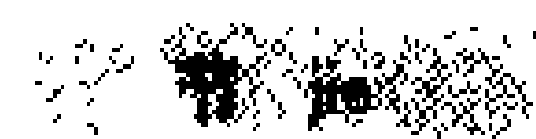
jieru xitong sheji

接入系统设计 (inter connection with power system) 对大中型水电站接入电力系统的方式、送电范围、出线电压、出线回路数等进行电气计算、分析和选定的工作。它是电力系统设计的一个组成部分。对小型电站可按电力系统设计已有资料进行设计,一般不专门做接入系统设计。

接入系统设计与电站的水能、水工、机电设计,以及电力系统结构方式、电力用户的送电距离和近区用电等都有密切关系。由于水电站大多地处高山峡谷,地形复杂,电站枢纽布置和出线都较困难,且远离负荷中心,一般均为远距离输电,技术问题较多。因此,要充分根据这些特点,通过技术经济分析后尽可能简化电站出线电压和出线回路数。

接入系统设计的原则是要注意远景和近期结合,由近及远,进行多方案技术经济比较。推荐方案要技术上先进,简化电力系统接线,过渡方便,易于发展,运行灵活和经济可靠地向系统供电。对电力系统中的不确定因素和变化因素要作敏感性分析。对于大型水电站还要研究扩大电力系统发挥调峰或补偿调节径流效益等问题。

设计内容 接入系统工作要和水电站的前期和设计工作相协调,相应分为接入系统配合、接入系统方案论证、接入系统设计和施工图系统配合四个阶段,因此设计内容和深度随设计阶段有所不同。接入系统设计



阶段的设计内容为:①设计依据和一般设计原则;②电力系统现状及设计电站概述;③负荷发展及分析;④电力电量平衡;⑤接入系统方案;⑥对电站电气主接线及有关电气设备参数的要求;⑦送出工程规模与投资估算;⑧结论和建议。

以上是接入系统设计电气一次部分的设计内容,而接入系统设计电气二次部分的设计,必须在一次接入系统方案审定或基本明确后才能开展工作,它的设计内容为:①设计依据和一般设计原则;②继电保护;③系统安全自动装置;④通信;⑤调度自动化;⑥投资估算;⑦结论和建议。

接入系统方式 水电站接入系统的方式大致有如下几种:①长距离多分段输电线路接入负荷中心;②中或短距离辐射式接入电力系统主网架;③以变压器—线路组接线方式接入附近变电所或主力水电站,然后升压接入电力系统;④作为主网网架的组成;⑤作为两个电力系统的联系枢纽。

送电范围和出线电压 根据电力系统规划设计的负荷发展及分析资料、水火电站的出力指标等,通过分区电力电量平衡计算出水电站出力、系统调峰需要和备用要求等,确定水电站的送电范围、出线电压和回路数等。

一般距离在 150 km 以内时,多以 110 kV 电压送电;在 150~300 km 左右时,多以 220 kV 电压送电;在 300 km 以上时,则以 330 kV、500 kV 或更高电压送电。在 800 km 以上时也有用±500 kV 或±600 kV 直流输电。

电气计算和分析 根据对水电站丰水年、枯水年不同代表日的典型运行方式分析,以及水电站保证出力、预想出力、强迫出力等出力指标,进行下列部分或全部校验性的电气计算和分析:①潮流计算分析,校验是否满足正常与事故送电能力需要以及相应的无功补偿容量。②校验稳定水平并提出提高稳定性的措施。③校验超高压长线接入系统时的工频过电压、潜供电流和自励磁,并结合电站无功出力情况提出限制措施。④校验电站投产后对有关系统的短路电流影响,并提供系统各序阻抗图和母线短路容量值。⑤对过渡年份进行研究,必要时提出过渡措施。

根据电气计算结果,对下列电气设备和参数提出要求:①水轮发电机是否调相或进相运行。②发电机的励磁方式及强励倍数、功率因数、暂态电抗和冷却方式等。③可逆式水泵水轮机组的起动方式,各种工况及工况转换时间要求等。④主变压器和联络变压器的容量、型式、分接头和是否需采用有载调压及调压范围,中性点接地方式和阻抗值等。⑤是否装设并联电抗器和电气制动装置。⑥电站需配置的安全自动装置的类型。⑦

对电站的自动化、远动化、继电保护等的要求。

(潘天缘)

节理

节理 (joint) 岩体中由各种成因的破裂面的统称,其两侧岩层一般没有明显的相对错动,习惯上有时也称裂隙。

节理面和断层面一样,可用产状确定其空间分布的几何特性。节理常有规律地成群出现,成因相同又互相平行的节理构成一个节理组,几个有成因联系的节理组构成一个节理系。节理的规模,短的延展只有几厘米或几十厘米,长的可以沿走向延伸几百米。

节理按成因分类可分为原生节理、构造节理和次生节理。①原生节理。是指岩石在成岩过程中所产生的节理。如沉积岩在成岩过程中,由于脱水体积收缩面产生的节理。岩浆岩在冷凝过程中由于体积收缩而产生的节理等。②构造节理。是指岩石受构造作用所形成的节理。按其力学成因,又可分为两类即剪节理和张节理。剪节理:由剪应力作用形成,常成对出现,称为共轭剪节理。节理面平直光滑,延伸性好,产状较稳定。砾岩或粗砂岩中的剪节理能平整地切割砾石和粗砂碎屑。节理面多闭合,裂面常见擦痕。张节理:由张应力作用形成,节理面粗糙,延伸性差,但沿其尖灭方向追索,则往往在不远处又可断续出现,分支和重合现象较常见。节理而没有擦痕、擦光面等痕迹。在粗砂岩和砾岩中节理面常绕砾石粗砂颗粒而过,并不切穿上述颗粒。由于节理面大多张开,易被岩脉、矿脉充填。③次生节理。是指地表岩石遭受风化、边坡重力与卸荷等作用所产生的节理。如风化节理、重力节理与卸荷节理等。节理还可按其岩层产状或褶曲轴的相互关系,分为走向节理(纵节理),倾向节理(横节理)与斜向节理(斜节理)。它们的走向分别与岩层走向或褶曲轴相平行、垂直与斜交。节理按发育程度进行的分级见表 1。

表 1 节理发育程度分级表

分 级	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
节理间距(m)	>2	2~0.5	0.5~0.1	<0.1
描 述	不发育	较发育	发育	极发育
完 整 性	整体	块状	镶嵌-碎裂	破碎

节理按宽度的分级见表 2。

表 2 节理宽度分级表

分 级	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
节理宽度(mm)	<0.2	0.2~1	1~5	>5
描 述	闭合	微张	张开	宽张

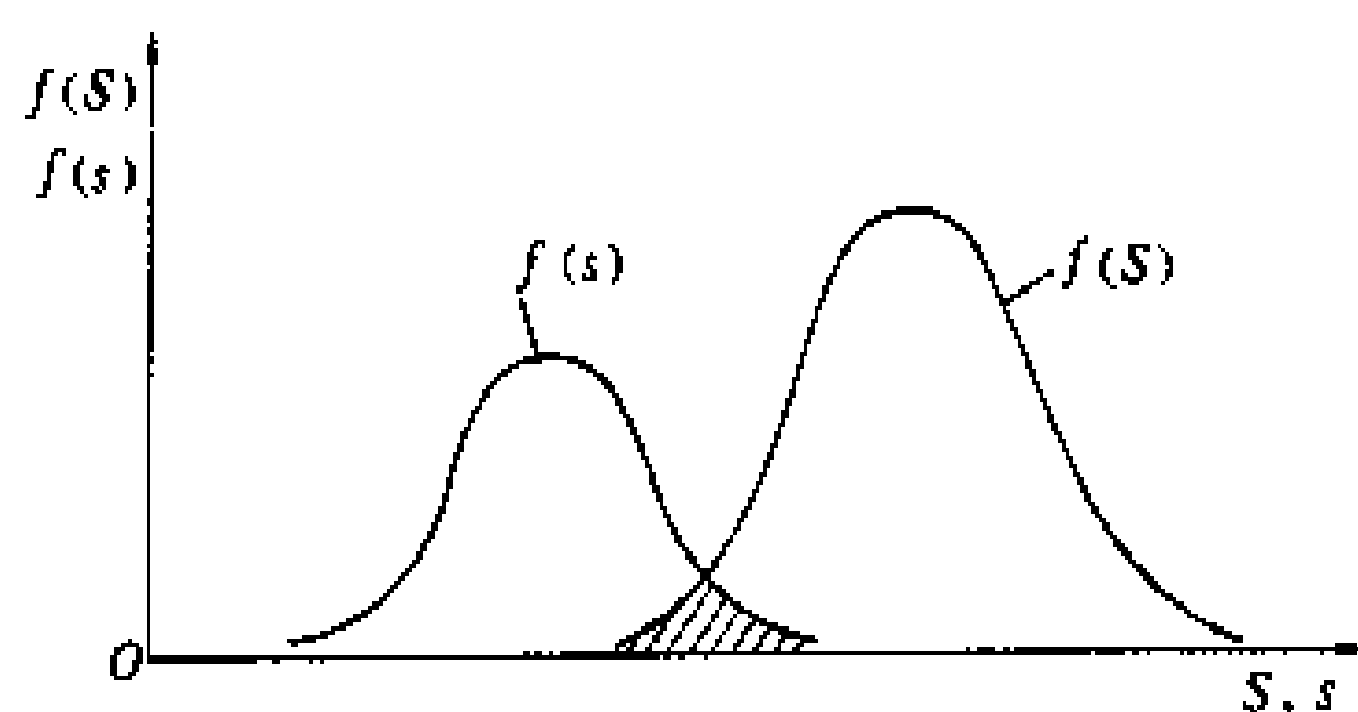
(赵鹤勤)



jiegou kekaodu

结构可靠度 (structural reliability) 结构在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率。结构可靠度与结构强度、载荷、应力和使用环境、维护条件等因素有关。如由于结构材料的化学成分、金相组织、内部质量等的不均匀性,加工尺寸及加工工艺的不稳定性等随机因素的影响,使结构强度 S 具有离散性,而呈分布状态 $f(S)$ (如图示)。同样,在温度、湿度、辐射、腐蚀以及使用方法、维护方法和操作人员技术水平等随机因素的影响下,应力 s 也是离散的,呈分布状态 $f(s)$ (如图示)。由于强度和应力均具有统计性,因此,结构完成规定的功能亦具有概率性。

图为结构强度和应力干涉模型。当强度和应力两条分布曲线的尾部发生干涉或重叠时,应力大于强度,此干涉区(图中阴影部分)即为结构发生失效的概率 $P(t)$ 。若强度和应力的离散程度小,则干涉区小,可靠度高。另外,随着时间的推延,结构可靠度也将降低。因此,在设计和评定结构功能时,必须规定相应的使用条件和寿命。



强度和应力干涉模型

可靠性技术建立在统计概率理论基础上,由于考虑了影响结构功能的各个随机因素及其离散性,所以用来度量结构的可靠性和安全性,较常规的安全系数法或许用应力法,更切合实际。从分析中可知如能有效地控制影响强度和应力的各种因素,减少它们的离散性,可以提高结构的可靠度。因而这种技术在结构和其他各类工程中都得到日益广泛的应用。

(张英会)

jiegou lixue

结构力学 (structural mechanics) 研究工程结构受力和传力的规律以及结构优化的学科,是固体力学的一个分支。工程结构是能承受和传递外载荷的系统。杆、板、壳以及它们的组合体(如房屋、桥梁等)都是工程结构。结构力学的研究任务是:①研究外载荷作用下工程结构中的应力、应变和位移的分布规律,为工程设计提供依据;②研究并改造结构分析和计算方法;③分析工程结构的承载能力;④研究和发展

新型工程结构;⑤结构优化设计。

结构分类 工程结构按其研究对象可分为杆系结构、薄壁结构和整体结构3大类,近代还发展了夹层结构和复合材料结构。

(1) 杆系结构。为由许多杆件连接起来的系统,其连接点称为节点。按其连接方式又可分为桁架和刚架。桁架中各杆件通过节点只传递力,而刚架中各杆件通过节点能传递力和力矩。两者都有平面和空间情况,前者所有杆件及所承受的载荷都位于同一平面内,而后者则不受此限制。

(2) 薄壁结构。由薄板、薄壳和细长构件组成的,能以较少的材料承受较大的载荷的轻型结构。它又可分为薄壁梁、薄板和薄壳。薄壁梁按断面有工字形、“U”形等不闭合形状的开口薄壁梁,也有圆管或方管等闭合形状的闭口薄壁梁。薄板和薄壳都是薄片状结构,平分各点厚度的面称中面。前者的中面是平面,而后者中面是曲面。前者受力后只引起弯矩和剪力,后者受力后还可引起薄膜力,可以大大增加薄壳承载外载荷的能力。随着航空工业的发展,薄板和薄壳材料有很大改进,如夹层板壳、复合材料板壳等,大大改善了工作性能。

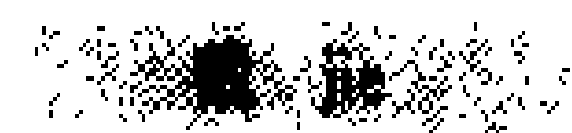
(3) 整体结构。指那些不能简化为杆系或薄壁结构的所有其他工程结构,如土坝等。一般情况下,其分析计算只能借助有限元等数值方法进行。

研究内容 结构力学研究的内容按其性质可分为结构静力学、结构动力学、结构稳定理论、结构断裂和疲劳理论等4个方面。

(1) 结构静力学。研究工程结构在静载荷作用下的弹塑性变形和应力状态以及结构优化的问题。静载荷是指不随时间变化的外加载荷。变化较慢的载荷也可近似地看作静载荷以简化分析计算工作。结构静力学是结构力学其他分支学科的基础。

(2) 结构动力学。研究工程结构在动载荷作用下的响应和性能问题。动载荷是指随时间而改变的载荷。在动载荷作用下结构内部的应力、应变和位移必然是时间的函数。其分析计算方法比静力学问题复杂得多,只有少数情况下有理论解,一般结构因形状不规则等因素只能求近似解,即先把真实结构离散化为一个具有有限个自由度的数学模型,在确定载荷后导出运动方程,再选用适当的方法求解。离散化方法主要有集聚质量法、瑞利-里茨(Rayleigh-Ritz)法(即广义位移法)和有限元法3种。得到运动方程后的求解方法有振型叠加法和逐步积分法。

(3) 结构稳定理论。研究工程结构的稳定性问题。现代工程中大量使用细长型和薄壁型结构,它们受力时往往会在内部应力远小于屈服应力的情况下发生失



稳现象,即结构产生过大的变形从而降低甚至丧失承载能力。使结构发生失稳的载荷称为临界载荷,而确定临界载荷是结构稳定理论的最重要内容。

(4)结构断裂和疲劳理论。研究工程结构在外载荷作用下的断裂和疲劳的过程和原因。工程结构内部不可避免地存在裂纹,会在外载荷作用下扩展而引起断裂破坏,也会在幅值较小的应变载荷作用下扩展而引起疲劳破坏。断裂和疲劳的研究历史不长,目前还不很完善,但发展很快。

发展简史 结构力学以前只是包含在材料力学、理论力学等学科中,直到19世纪中叶才形成独立的学科。1826年C. - L. - M. - H. 纳维(C. - L. - M. - H. Navier)提出了求解静不定问题的一般方法。1864年J. C. 麦克斯韦(J. C. Maxwell)创立单位载荷法和位移互等原理,为求解超静定结构的力学奠定了基础。1873年A. 卡斯蒂利亚诺(A. Castigliano)提出了卡氏第一定理,导出了多腹杆桁架的近似算法,这一时期对于结构稳定性理论也做了一些研究。结构力学至此才初具规模。从20世纪初至今,由于航空、船舶和建筑等行业的发展,需要求解大规模的超静定系统。1914年A. 本迪克森(A. Bendixen)提出了转角位移法,1932年H. 克罗斯(H. Cross)提出了力矩分配法,推动了结构力学的发展。20世纪50年代M. J. 特纳(M. J. Turner), L. C. 托普(L. C. Topp)等人提出了有限元法,使结构力学的分析求解与电子计算机联系起来,并出现了结构矩阵分析法,效率大大提高。70年代以后出现了许多功能很强的分析程序,使许多复杂结构可以求解并得到可靠的结果,从而使结构力学的面貌大大改观。

(范元勋)

jiegou youhua

结构优化 (optimization of structures)

制定给定条件下结构最优设计方案的方法。传统的结构设计方法是通过反复修改而得到一个符合设计规范要求的设计方案,它是一个可行方案,通常不是给定条件下的最优方案。采用最优化数学方法进行结构优化设计可更好达到预想目标和较好经济效益。结构优化有优化准则法和数学规划法两类。

优化准则法 从工程和力学观点出发,提出优化设计所应满足的某些准则,然后设法求出满足这些准则的结构方案。最常用的是满应力准则,它要求结构各控制点上的应力等于材料的允许应力,根据这个条件计算出结构的尺寸。除应力外,也可用变位、自振频率等作为控制条件。优化准则法计算比较简单,但它不能对结构的形状进行优化,只能在给定结构形状后,优选

结构的断面尺寸,如厚度、惯性矩等。

数学规划法 把设计规范所规定的各项条件,如允许应力、允许变位、抗滑稳定、频率禁区、允许渗透水力比降等作为约束条件,用数学规划方法求出满足全部约束条件的最优解。所谓最优,通常是指造价最低,也可根据工程要求确定优化目标。用数学规划法不但可以优选结构的断面尺寸,还可以对结构的形状进行优化。结构优化通常是非线性问题,要用非线性规划方法求解。在结构优化过程中所要选择的变量称为设计变量,如钢筋混凝土梁的高度、宽度及各部位的钢筋截面积;拱坝的坝轴线位置及不同高程的半径、厚度等。当只有一两个变量时,可用图解法或分析法(乘子法)求解。当设计变量不超过10~15个时,可用复形法求解。当设计变量超过10~15个时,可用序列线性规划法、罚函数法、梯度投影法等方法求解。

在结构优化过程中,一般要进行几百次甚至上千次的结构应力分析。尤其对于大型结构,计算量十分庞大,要耗费大量计算机时间。为解决这个问题,可采用应力展开法或内力展开法,前者需迭代10~20次,而后者通常只需迭代2~3次。

参考书目

朱伯芳,黎展眉,张璧城. 结构优化设计原理与应用. 北京:水利电力出版社,1979

(朱伯芳)

jieliu

截流 (river closure) 在施工导流过程中,截断河水,迫使水流通过导流泄水建筑物下泄的施工措施。在修建横向围堰过程中,先用块石料、石渣料或砂砾料堆成戗堤,从一岸或两岸的河床进占,将河床过水断面不断缩小,当断面缩减到非常小时,流速和戗堤上下游落差迅速加大,此时以相当大的施工强度抛投材料,在很短的时间内最后封堵戗堤。封堵戗堤缺口的工作称为合龙。合龙常是水电站建设中最困难而紧张的施工控制阶段。

截流前的准备工作包括:选择最适宜的截流时段和龙口(合龙时戗堤最后留下的过水断面)位置;制定截流施工计划,根据计划要求储备各种形状和重量的抛投材料;准备足够的施工机械和运输设备;各储料场至截流现场的道路、照明和通信设施;截流时现场指挥、调度和管理的分工组织等。

截流时段 选择截流时段要考虑截流流量和整个工程的施工布局。根据河流特性、水文、气象资料及近期预报,既要把握截流时机,选择最枯流量,又要能为后续工程留有余地。一般截流时段有汛后截流和汛前截流两类。汛后截流又称落水期截流,河水流量随着截

流时间后移而逐渐减小,便于围堰工程抢在洪水到来之前完成,多数工程的截流时段都选在汛后。汛前截流又称迎水期截流,河水流量随着截流时间后移而逐渐加大,虽然有时河水处在最小流量,但因时在汛前,即使合龙顺利,由于汛前工期有限,也常造成围堰施工被动,一般不常选用。

在通航河道上截流,最好选在对航运影响较小的时段,因为在截流过程中,不论是否已修建临时或永久通航建筑物,由于截流时的水位变化很大,航运均需停止。

在有冰凌的河流,不能在流冰期截流。因为冰凌容易堵塞河床或泄水建筑物,壅高上游水位,给截流增加困难,且在截流后戗堤前堆积大量冰块、冰屑,增加合龙后的闭气(即用防渗土料及反滤料将合龙后的戗堤渗流通道堵塞的工程措施)困难,因冰块夹在防渗料或反滤料间,闭气土料不易固结,当气温转暖冰块溶化时,将使围堰沉陷增加,破坏防渗体及反滤层性能,造成围堰渗漏。

龙口位置 通常根据截流戗堤处的地形、地质、交通和水力学条件选定。一般选在河床主流抗冲能力强的位置,便于合龙时河水能顺利下泄。在可冲刷河床,截流前要增加护底措施,以增大龙口糙率,减少合龙时抛投材料的抛投量和流失量,降低截流难度。如中国长江葛洲坝水利枢纽工程大江截流,龙口河床段选用栏石坎保护,护底范围 $120\text{ m} \times 50\text{ m}$ 。在围堰或坝体预填筑部位,要用抗冲材料如抛石、竹笼填石、铁丝笼填石等将临水面事前保护。

截流方法很多,通常采用的有立堵法、平堵法和立平堵法等几种。

立堵法 又称进占法,是将抛投材料从龙口一端向另一端或从两端向中间抛投进占,逐渐缩窄河床直至合龙。这种截流方法简单易行,辅助设备少而经济,但龙口水流能量随着过流断面缩窄而不断加大,且流速分布极不均匀,需要制备的重大抛投体材料相对较多,在合龙过程中随着流速的变化,要适时更换抛投材料种类、强度和抛投技术。根据水力因素,立堵截流又可分为单戗堤立堵截流和双戗堤或多戗堤立堵截流两种。①单戗堤立堵截流适用于龙口最大落差较小的河流,为目前大多数工程采用的截流方法。②双戗堤或多戗堤立堵截流是有两道或多道截流戗堤同时进占,将河流龙口总落差分散,降低抛投块体重量,改善截流难度,一般适用于龙口最大落差较大的河流截流。

平堵法 在截流戗堤的上游或下游架设栈桥、浮桥或缆索式起重机的架,将抛投材料从栈桥、浮桥或由缆索式起重机倾入河床,使戗堤全线均衡上升直至露出水面的截流方法。这种截流方法的水力学条件相对较好,

龙口单宽流量较小,出现的最大流速也较小,且流速分布比较均匀,抛投材料的单个重量也可较小,但栈桥、浮桥或缆索式起重机的架设困难,费用昂贵,且截流工作面长,抛投强度大,施工技术比较复杂。

立平堵法 为减少截流费用,在宽河床,大流量截流,常先用立堵进占缩窄河床,最后架设栈桥平堵的合龙方法。

其他截流法 有时为了克服特殊水力条件,充分发挥抛投材料数量或强度的特性,采用将河水瞬时截断的其他截流方法,如:①在河谷狭窄、两岸陡削地形,或在龙口附近预先制作大块混凝土或堆置大量抛投料,用定向爆破或其他方法将岩体、预制块或预堆置的大量抛投料抛入龙口截流。②在明渠或其他泄水河道,预先修建截流闸分流减小落差,待戗堤合龙后再下闸门截流。③利用旧驳船、旧船壳浮运至截流龙口,合龙时用块石加载或打开专设阀门充水将船体沉入龙口截流。④在河床平整,流速和水深不大的大流量河道,用钢板桩围堰直接合龙截流等。

平堵法在大流量河流截流中使用较多。20 世纪 60 年代以后,由于大容量施工机械和运输设备的飞速发展,截流抛投强度不断提高,采用多戗堤(或宽戗堤)进占使落差分散等原因,大流量截流已不十分困难。如:1978 年巴西伊泰普(Itaipu)水电站采用 4 戗堤立堵,截流流量 $8000\text{ m}^3/\text{s}$,最大落差 3 m ;1981 年中国长江葛洲坝水利枢纽采用单戗堤立堵,截流流量 $4780\text{ m}^3/\text{s}$,最大落差 3.23 m ,相应最大流速 7 m/s 。

(陈魁芳)

Jingsha Jiang shuidian guihua

金沙江水电规划 (hydropower development planning of Jinsha river)

根据长江水利委员会 1988 年提出的《长江流域综合利用规划要点修订补充报告纲要》和成都(水电)勘测设计院 1981 年提出的《金沙江渡口—宜宾段规划报告》安排,金沙江梯级水电站由东就拉、晒拉、俄南、白立、降曲口、巴塘、王大龙、日兔、拖顶、虎跳峡、洪门口、梓里、皮厂、观音岩、乌东德、白鹤滩、溪落渡、向家坝等 18 级水电站组成(见图)。18 级水电站共利用水头 3142 m ,共有库容 1283 亿 m^3 ,其中调节库容 472 亿 m^3 ,可装机容量 62070 MW ,平均年发电量 $3378\text{ 亿 kW}\cdot\text{h}$ 。

沱沱河、通天河和金沙江都是长江干流的一个河段。沱沱河在最上游,发源于唐古拉山脉,长 358 km ;与当曲会合后至青海省玉树县巴塘之间的河段称通天河,长 815 km ;自巴塘到宜宾段称金沙江,长 2308 km 。宜宾以上河段水面落差 5140 m ,流域面积 50 万 km^2 ,宜宾处多年平均年水量 1550 亿 m^3 ,拥有水能理

论蕴藏量(见水能资源)5093 亿 kW·h/a。沱沱河和通天河还没有编制较完整的规划报告。

开发金沙江水资源的主要任务有发电、航运、防洪、漂木等。金沙江水电站除可供给四川省和云南省电力外,已开始研究送电到中国缺少能源的华中、华东地区。流域内林、矿资源丰富,为输出林、矿资源要求改善河道航运条件。利用梯级水库调节径流还有利于金沙江和长江干流的防洪。

开发金沙江水电站的自然条件优越,其中虎跳峡以下的 9 级水电站是重点开发对象,共利用水头 1614 m,总库容 814.4 亿 m³,其中调节库容 336.4 亿 m³。这 9 级水电站的装机容量和年发电量均占全部金沙江水电站的 80%左右。虎跳峡、白鹤滩、溪落渡水电站是其中调节性能较好的电站,具有较大的库容。但与年径流量相比,3 座电站合计的调节库容为 154 亿 m³,只是多年平均年径流量的 10%,所以金沙江梯级水电站是装机规模巨大但调节能力并不很强的水电站群。待上游支流雅砻江两河口、锦屏水库建成后,调节能力会显著提高。规划建议先开发溪落渡和向家坝水电站,因这两座电站位于最下游,地理位置较好,对外交通较方便。

岩、泥岩夹煤层,河床覆盖层厚 60~90 m。坝壅水高 112 m,总库容 54.4 亿 m³。水电站装机容量 6000 MW,年发电量 331.3 亿 kW·h。水库淹没耕地 2190 ha。

(陈励元)

jinsu jiegou anzhuang

金属结构安装 (metallic structure installation)

将金属结构的成品或半成品,装在水电站中设计位置的施工与调试过程。水电站的金属结构通常是指压力钢管、闸门、拦污栅和各种启闭设备等。上述设备除压力钢管多在现场制造外,其余大部分在工厂制造,以成品或半成品方式到货,然后在现场拼装与安装。

压力钢管制造与安装 压力钢管的作用是将水电站进水口或压力前池的水引向水轮机,一般由直管、弯管、岔管、伸缩节等组成。钢板运到现场后,经矫平、划线、切割、卷板、修弧、对圆、焊接等工序,即成待装管节,如起重运输条件允许,可将几个管节组焊成一个较长的管段,经检验合格后安装。

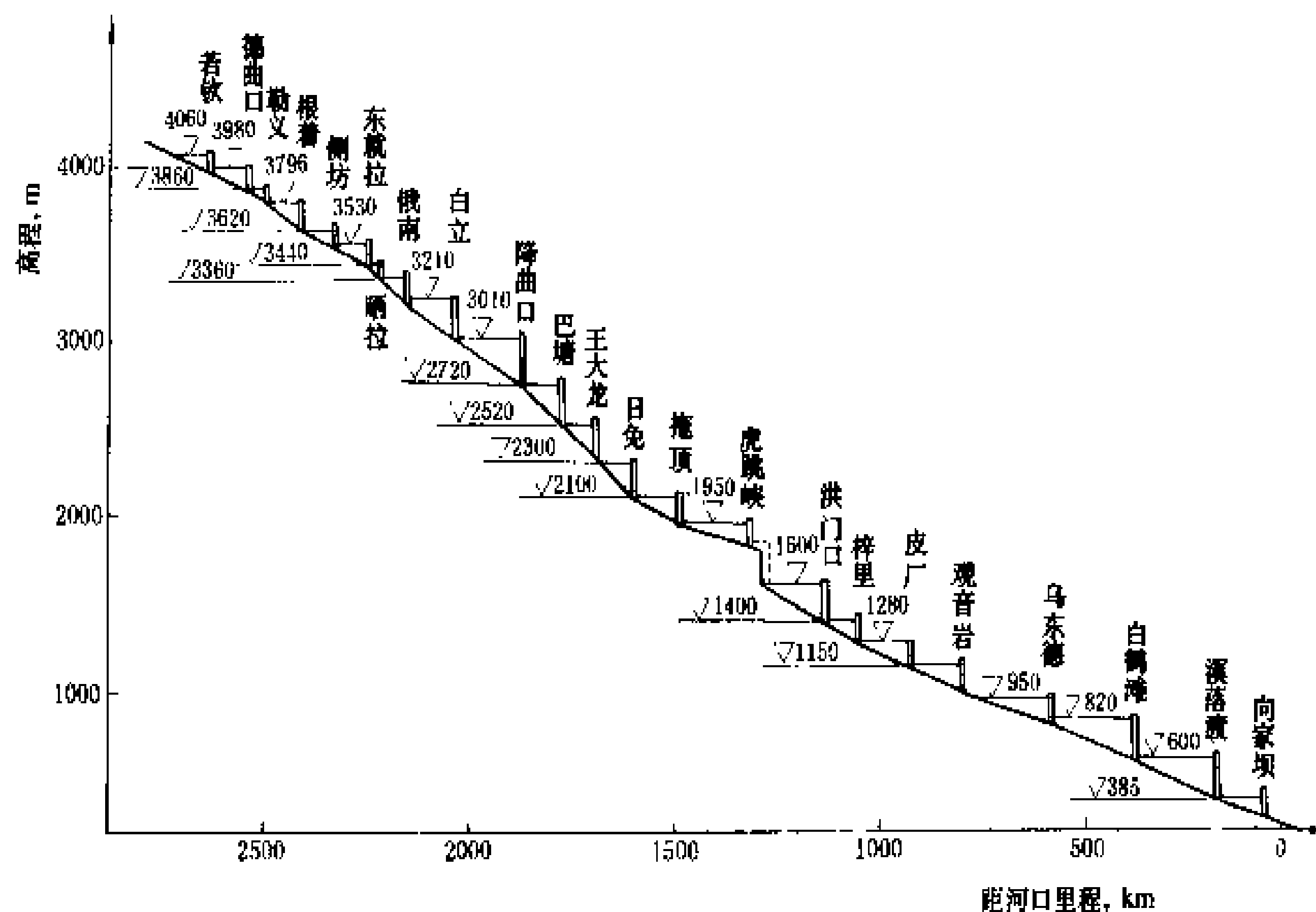
(1) 直管、弯管是压力钢管的主体部分,一般先从

水平段的弯管处开始安装第一节,称始装节。它是以后安装的基准,其中心高程、里程和中心要严格控制,经检查合格后,将它牢固固定,然后自下而上依次逐节(段)进行对装。对装时相邻两节(段)的纵缝要相互错开一段距离,待弯管安装完后,进行浇筑混凝土,浇筑混凝土时,须将弯管两端留出一定长度,以利下阶段的

安装与焊接。

(2) 岔管是起分配水流作用的,由于其体形比较复杂,且焊缝集中,因此,制造前必须制定严格的制造工艺。岔管的工艺,关键在下料和焊接。岔管制作完后,对所有焊缝均须进行无损探伤、局部或整体热处理,然后进行水压试验,待其合格后才运往现场安装。

(3) 伸缩节的作用是减小钢管由于温度变化而产



金沙江梯级水电站布置图

溪落渡水电站位于宜宾上游 180 km,坝式开发(见水力发电),坝址河谷深窄,为“V”形对称河谷。坝段位于玄武岩区,地质构造较简单。坝壅水高 229 m,总库容 120.7 亿 m³。水电站装机容量为 11440 MW,年发电量为 626.6 亿 kW·h。水库淹没耕地 2320 ha,迁移人口 2.9 万人。

向家坝水电站位于宜宾上游 35 km 处,坝区为砂



生的轴向应力,同时也可适应不均匀的沉陷。其加工制造大部分在工厂进行。它的安装方法和钢管一样,其不同点是安装时要注意内外套管的间隙值,须调整均匀,便于填装止水盘根。近年来由于管径不断增大,给制造运输带来很大困难,经设计论证后,也有取消伸缩节的。

(4) 中间支座安装,明管安装和上述安装方法一样,都是从填装处开始,所不同的是它增加了中间支座的安装。中间支座型式很多,主要有滚轮、滑动鞍形和摇摆等型式。支座安装后,应能灵活动作,没有卡阻现象。如系摇摆支座时,还应注意安装时的温度与设计温度的差值,据此算出它的伸长或缩短的数值,进行支座位置的调整。

(5) 为了检验钢管的安装与焊接质量,整条钢管安装完后,有的要求做整体水压试验。如果电站水头高、管线长,多采用分段试压,以免出现其上部已超过试验压力值,下部尚未达到试验压力的现象。

闸门和拦污栅的安装 水电站的闸门种类很多,主要有平面闸门、弧形闸门、链轮门、人字门等。这些闸门(人字门除外)和拦污栅的安装方法基本相同,它们的安装分埋件和门叶、栅体两部分。

(1) 埋件安装。它分底坎、门楣、主轨、反轨和侧轨等。埋件安装,通常在预先浇好的门槽内进行,先安装底槛,然后自下而上再装主轨、反轨和侧轨,并用预埋螺栓进行调整,待其中心、高程、里程以及它们的相关位置均合格后,将其加以固定,并浇筑二期混凝土。弧形闸门的门楣二期混凝土,必须晚浇,以便消除弧形闸门的里程公差。为了缩短直线工期,也有个别电站取消二期混凝土,先将埋件组装成整体,一次将它浇入混凝土内。但这种安装方法,固定埋件的刚度要大,消耗材料多,否则容易走样变形,质量难以控制。

(2) 门叶与栅体安装。由于门叶体积较大,往往因运输上的限制多采用分节到货,在门槽内或门槽外拼装焊接成整体。拦污栅多在工地制造,成扇吊入槽内。闸门拦污栅安装好后,须做起落试验。如果是多孔共用的检修门,门叶安装好后,要在各个孔的门槽内,进行起落试验,防止个别门槽出现卡阻现象,达不到公用的目的。

(3) 人字门安装。人字门埋件分底枢、枕座、顶枢和底槛四部分。埋件的安装方法和其他门的埋件一样,唯有底槛安装程序和其他门不一样,它的里程、高程只能暂时定位,且先不浇筑二期混凝土,等门叶水封装好后,将人字门关闭,调整相关位置,再浇二期混凝土。门叶安装多在闸门室内进行,首先把安装用的临时支座铺设好,然后将下节门叶吊放在支座上,等它调整合格后,再往上顺次吊装。在整个安装和焊接过程中,要

随时检查各部位公差和监视焊接变形。等门叶拼装和焊接完成后,利用背拉杆调整门叶整体刚度,检查斜接柱的跳动量,浇注支垫块填料,最后连机调试。

启闭机安装 启闭机是起吊闸门的设备。它分固定式和移动式两种。

(1) 固定式启闭机通常又分卷扬、液压和螺杆式三种,前两种应用最为广泛,后一种在小水电和小型水利工程上应用较多。小型单吊点、单机架卷扬机一般为整体吊装,双吊点多机架卷扬机多采用分件吊装。根据闸门吊点中心来找卷筒中心,而且左右卷筒的同心度,要调整在同一直线上,然后以卷筒开式齿轮为基准,调整其他部件。两卷筒之间如果采用刚性联轴连接时,应动作灵活,无蹇劲现象。液压启闭机经检查清洗后,整体吊装,以闸门的实际中心找正安装,最后和油压系统连在一起进行调试。

(2) 移动式启闭机分门式、台式和桥式三种。它们都在轨道上行走,具有一机多用的功能。这三种机型的安装方法,大致相同。门机经检查合格后,在轨道上进行安装,其安装顺序,先组装门架行走台车,接着吊装门腿、主梁和端梁。等门架组装成整体后,调整其相关的几何尺寸和公差,并利用螺栓连接成整体,然后吊装小跑车并安装调整传动装置和电气控制系统。

(3) 启闭机安装完毕后,连同闸门一起进行启闭试验。门机须进行模拟操作和负荷试验。

(欧阳金)

Jinshuitan Shuidianzhan

紧水滩水电站 (Jinshuitan Hydropower Station)

位于浙江省云和县瓯江上游大溪的支流龙泉溪上,距云和县城 19km,距丽水县城 66km,以发电为主,兼有防洪、过木(竹)、航运、养殖等综合效益。装机容量 300MW,多年平均年发电量 4.9 亿 kW·h,保证出力 30.3 MW。以 1 回 220 kV 输电线接入华东电网,担任调峰任务,并以 220kV 输电线路 1 回、110 kV 输电线路 4 回供电给丽水、云和、龙泉和古市,其中,110 kV 1 回为备用。主坝为双曲拱坝,最大坝高 102 m。工程于 1981 年 4 月开工,1986 年底第一台机组发电,1988 年底 6 台机组全部投产。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 2761 km²,多年平均年径流量为 31.5 亿 m³,多年平均流量为 100 m³/s。水库正常蓄水位 184 m,相应库容 10.4 亿 m³;死水位 164 m,相应库容 4.87 亿 m³;最低消落水位 160 m,相应库容 4.13 亿 m³。千年一遇设计洪水流量 11700 m³/s,相应库水位 190.3 m;万年一遇校核洪水流量 14900 m³/s,相应库水位 192.7 m。总库容 13.9 亿 m³,调节库容 6.27 亿 m³,为年调节水库。电站设

计水头 69 m, 最大水头 85 m, 最小水头 60.5 m。

枢纽布置 电站枢纽主要由混凝土三心圆双曲变厚拱坝, 左、右岸中、浅孔滑雪道式溢洪道, 坝后式厂房, 开关站以及货、筏过坝设施等建筑物组成, 见图。

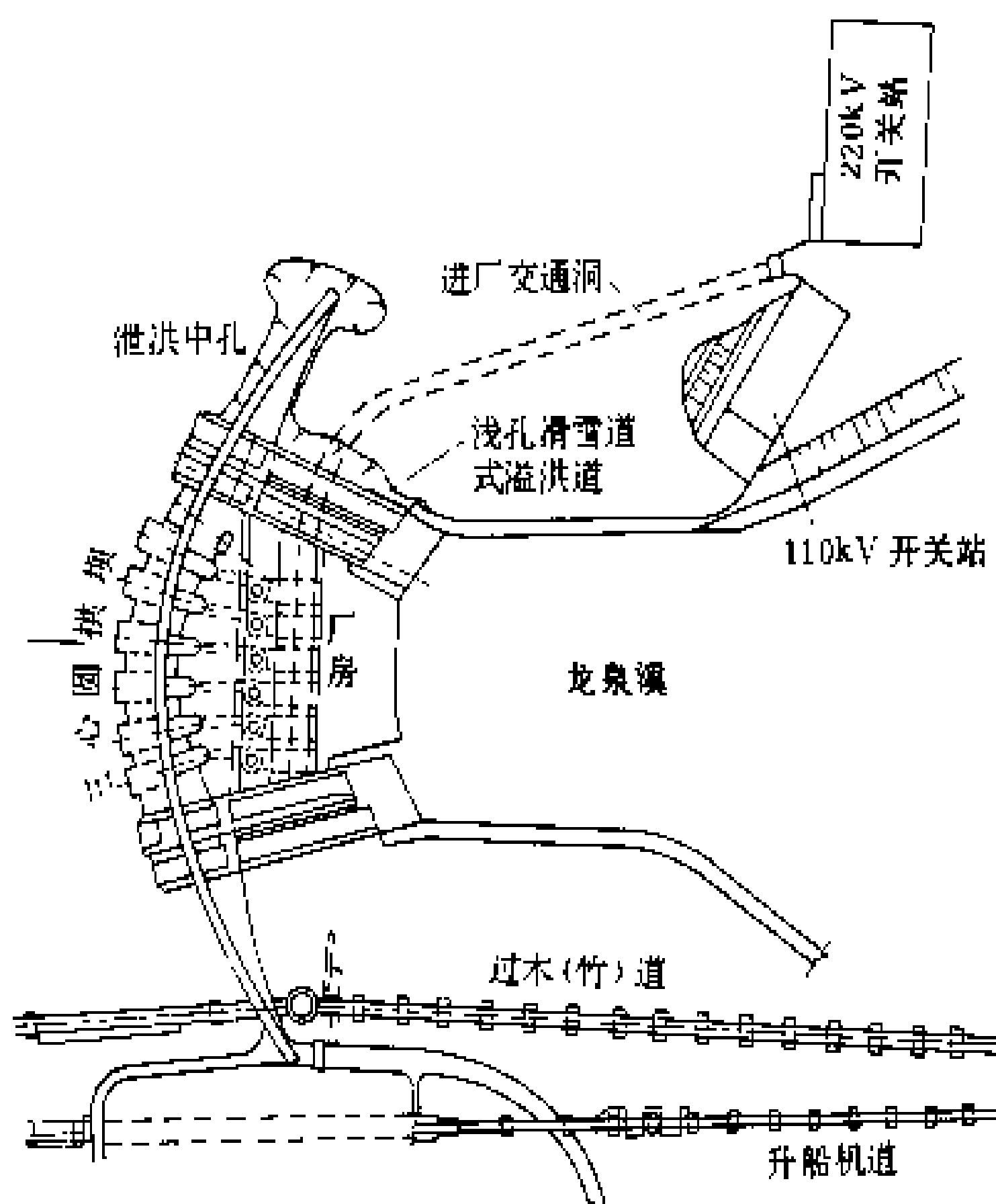


图 1 紧水滩水电站枢纽平面布置图

双曲拱坝建于微风化的花岗斑岩基础上。河谷宽高比为 3.1。坝顶高程 194 m, 坝顶弧长 350.6 m, 最大底宽(厚) 24.6 m。河床中部为等厚的中圆拱, 左右侧为变厚度的侧圆拱。左、右岸设中孔和浅孔滑雪道式溢洪道各一座。浅孔泄放常年洪水, 出口孔口宽 8.6 m, 高 13.91 m, 进口底坎高程 161 m, 滑雪道长 85 m; 中孔除泄洪外, 兼做放空水库及后期导流用, 孔口宽 7.5 m, 高 11.68 m, 进口底坎高程 135.8 m, 滑雪道长 76 m, 最大总泄量 $6177 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

厂房布置于坝后, 长 126.5 m, 宽 18 m, 高 35.8 m。厂房内安装 6 台混流式水轮发电机组, 单机容量 50 MW。电站引水采用单机单管方式和坝后背管布置, 进水口底坎高程 147.55 m。副厂房位于主厂房上下游两侧, 3 台 120 MV·A 三相变压器布置在尾水平台上。220 kV 屋外开关站布置在左岸下游金水沟口。110 kV 配电装置为屋内式。货、筏过坝建筑物位于右岸。客、货轮过坝采用高低轮式斜面升船机, 船道全长 845 m, 其驼峰段通过 1 条宽 8 m, 长 143 m 的隧洞。转盘式木竹缆车道全长 644 m, 峰顶转盘位于右坝肩(参见彩图插页第 48 页 95 图)。

工程施工 设计总工程量为: 土石方开挖 323 万 m^3 , 混凝土浇筑 88 万 m^3 , 金属结构安装 3200 t。电站施工采用隧洞导流、一次断流、全年施工方式。上游采用低热微膨胀水泥混凝土拱围堰, 下游为混凝土重力

式围堰, 右岸导流洞还承担施工期通航、过木(竹)任务。

设计和施工单位 华东勘测设计院设计, 水利电力部第十二工程局施工。

(袁 玖)

jin kou a

进口阀 (inlet valve) 为了事故、检修或较长时间停机而在水轮机前设置的阀。一根钢管分叉向几台机组供水或压力引水管很长时, 一般在水轮机前设进口阀。进口阀主要有闸阀、蝴蝶阀、球阀。闸阀尺寸大、重量重, 一般只用于钢管直径较小的小型机组; 蝴蝶阀尺寸小、重量轻, 但水力损失较大, 常用于大直径中、低水头机组; 球阀用于中等直径高水头机组。

进口阀是保护机组和水电站的重要设备, 能承受包括水锤在内的各种水压力和振动, 能在动水下紧急关闭, 关闭时间应小于机组允许飞逸的时间, 能在阀前后有一定压差的情况下开启。

进口阀有手动、电动、油压和水压四种操作方式。为提高事故关阀的可靠性, 蝴蝶阀和球阀常用重锤关闭。

(吴次光)

jin shui zha

进水闸 (intake sluice) 开敞式进水口的取水建筑物。它由进口连接段、闸室和出口连接段三部分组成(见图)。闸室控制进入引水道的水流, 其结构主

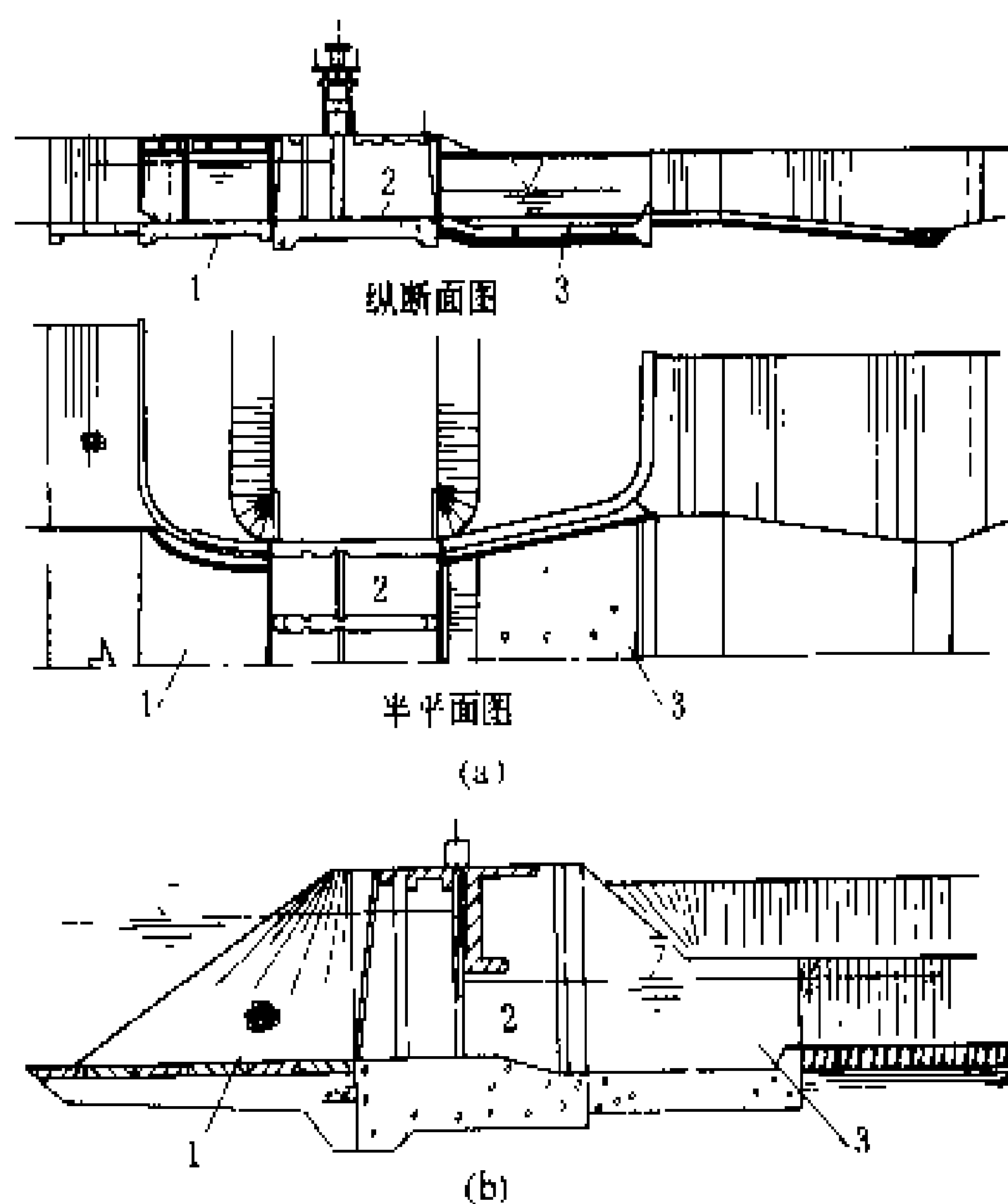


图 2 进水闸示意图

(a) 开敞式进水闸; (b) 有胸墙的开敞式进水闸

1—进口连接段; 2 闸室; 3 出口连接段



要由底板和边墩构成。若引用流量较大，可增设闸墩，将闸室分隔成若干个闸孔，各闸孔装设工作闸门及启闭机，检修闸门数量可少于闸孔数，用移动式启闭机启闭，周转使用。闸室前沿设置拦污栅，拦污栅可与检修闸门同槽。边墩除支撑两岸的岩土压力外，还与闸墩共同支承闸室的上部结构（启闭机工作桥和交通桥）。

开启闸门引水时，进口连接段水面跌落，流速逐渐增大，常作护底和护坡，防止冲刷。紧靠闸室底板的上游设置防渗铺盖，增长渗径以降低闸基的渗漏。两岸作上游翼墙与边墩连接，形成逐渐收缩的断面，使水流平顺、均匀地进入闸室。翼墙插入两岸以减少侧向绕渗，也起挡土防冲的作用。

由于闸墩约束的影响，过闸水流流速较大，为了使过闸水流均匀扩散，平顺地与引水道连接，需设出口连接段。紧接两岸边墩作下游翼墙，使过水断面逐渐扩宽；下游翼墙后设护坡和海漫，防止冲刷。

进水闸前水位变化较大时，在闸孔上部常设置具有曲线下缘的胸墙，以减小闸门的高度。

（丁志华）

径流

降水到达地面后从地面和地下汇入河道、湖泊或海洋的水流。包括地面径流、渗入地表后沿着土壤表层相对不透水层界面流向河道的表层流（也称壤中流）和从地下排入河道的地下径流。习惯上把地面径流和表层流合并称地表径流，把完全由地下水构成的径流称作基流。径流量是指在一定时段内流过河道某一断面的水量，如汛期径流量、枯季径流量、年径流量等。年径流量则是评价河流水资源和水能资源的重要定量特征。广义的径流还包括固体径流（含沙量）和化学径流（含盐量）等。径流是水循环的重要环节。按径流成因可分为降雨径流和冰雪融水径流两类。由降雨形成的径流，要经过植物截留、下渗、填洼、流域蒸散发、坡地和河网汇流等过程，最后汇集到流域出口断面。由冰雪融水形成的径流，先要有一定的热量条件，使冰雪融化为液态水。如在冰雪融化期间遇到降雨，则形成雨雪混合径流。

影响径流的因素 有气候因素（降水、辐射、气温、风速等）、自然地理因素（流域面积、河道坡度、地质、地貌、植被、土壤等）、人类活动（土壤利用、农林措施、水利工程）等，其中以气候因素影响为主。根据水量平衡原理，河流的径流总量等于流域内的降水总量减去蒸散发损失、渗漏损失和流域蓄水变化量。影响径流的气候因素在地区上有一定的分布规律，还具有明显的年内、年际的周期性变化，所以世界各地的径流也相应地存在着地区性和周期性变化的特点。自然地

理因素对径流量及产流汇流有一定影响。同样气候条件，流域面积愈大，径流量愈大；地质、土壤条件不同，地面径流、壤中流和地下径流占总径流量的比例也不同。人类活动可以改变径流量及年内、年际分配。大型灌区引水减少了下游河道径流量，年、季调节或多年调节水库可改善径流年内或年际分配。

地区分布 多年平均年径流量（亿 m³）或多年平均流量（m³/s）是河流重要的水文特征值。它也常用年径流深（单位集水面积年径流量折算的平均水层深度，以 mm 计）或年径流模数〔单位集水面积上所产生的年平均流量，以 L/（s·km²）计〕表示，以便在河流之间进行比较。世界部分国家年径流量及年径流深见表。中国境内年径流深的分布趋势同年降水量的

世界部分国家年径流量

国 名	面 积 (km ²)	平均年径流量 (亿 m ³)	平均年径 流 深 (mm)
中 国	9596960	27115	282.5
日 本	377710	4494	1189.8
印 度	3287590	17800	541.4
苏 联	22402200	47200(外来 3330)	210.7
德 国	356760	1787(外来 820)	500.9
英 国	244820	1590	649.4
法 国	547030	1800	329.0
意 大 利	301230	1550	514.5
埃 及	1051450	555	52.8
阿尔及利亚	2381740	150	6.29
扎 伊 尔	2345910	10190	434.4
澳 大 利 亚	7686850	4400	57.2
新 西 兰	268680	3970	1477.6
加 拿 大	9976140	22674.9	227.3
美 国	9372610	29702	316.9
巴 西	8511970	51912	609.8
阿 根 廷	2766890	9140	330.3

分布基本一致，由东南沿海向西北内陆递减，但其不均匀性比降水量更为严重。全国按径流深的多少可以划分 5 个明显不同的地带。①丰水带：年径流深大于 800 mm，包括东南和华南沿海、云南西部和西藏东南部。②多水带：年径流深 200~800 mm，位于秦岭、淮河以南，长江中下游以及云贵、四川和广西地区。③过渡带：年径流深 50~200 mm，包括黄淮海平原，陕西、山西和东北大部，四川西北和西藏东南部以及新疆天山部分山区。④少水带：年径流深 10~50 mm，包括东北西部，内蒙古、宁夏、甘肃、青海大部，新疆的西部和北部。⑤缺水带：年径流深小于 10 mm，包括内蒙古、宁夏、甘肃的沙漠，青海的柴达木盆地，新疆的塔里木和准噶尔盆地。

季节分配 受纬度、地形及大气环流的影响,世界各地都有不同的丰水和枯水季节。地中海沿岸地区冬季多雨丰水,夏季干旱枯水。温带阔叶林区及热带雨林区,全年降雨比较均匀,无明显丰水期和枯水期。中国属于温带季风气候区,具有夏季丰水、冬季枯水、春秋过渡的特点。径流的季节分配主要取决于河流的补给条件。以雨水补给的河流,季节性变化剧烈,汛期河水暴涨,容易泛滥成灾,枯季水量很小,水源往往不足。以冰雪融水补给为主的河流,由于流域内热量的变化比雨量的变化小,年内分配较为均匀。雨水和季节性冰雪融水补给的河流,每年有春、夏两次汛期。地下水的补给比重各地相差很大,一般河流占年水量的20%~30%,最高达60%~70%,最少不足10%。青藏高原以及黔、桂喀斯特(岩溶)分布区地下水的补给较大,径流年内分配比较均匀。大江大河因承受不同地区径流的汇注,地下径流的补给又受到河网湖泊的调蓄作用,径流年内分配也比较均匀。

年际变化 水量丰沛地区,丰枯水年水量相差较小;水量贫乏地区,丰枯水年水量相差较大。以历年最大和最小年径流量对比,长江以南各河流和松花江一般都小于3倍;淮河、海河各支流可高达10~20倍,部分平原河流相差更大。有的河流还存在着连续枯水年和连续丰水年交替出现的情况。例如黄河在60年期间,曾经出现过连续11年(1922~1932年)的枯水期,这个时期的平均值比多年平均值少24%;也出现过连续9年(1943~1951年)丰水期,这个时期的平均值比多年平均值多19%。

参考书目

施成熙,梁瑞驹主编. 陆地水文学原理. 北京:中国工业出版社,1964

水利电力部水文局. 中国水资源评价. 北京:水利电力出版社,1987

(陈志恺)

jingliushi shuidianzhan

径流式水电站 (run-of-river hydropower station) 基本不调节径流,按来水流量发电的水电站。当来水流量大于电站水轮机过水能力时,水电站满出力运行,多余的水量不通过机组发电,直接经泄水道泄向下游,称为弃水;当来水较少时,全部来水通过机组发电,但有部分装机容量因缺水而未被利用。水电站这种运行方式称为径流发电。与径流式水电站相对应的是调节式水电站,其运行方式是用水库调节径流,据用电要求发电;来水多于需要时,水库蓄水;不足时,水库补水。调节式水电站包括有多年调节、年(季)调节、周调节、日调节等水电站(见径流调节)。其中日

调节水电站一般只在枯水季进行日调节,在汛期常采用径流发电方式,所以有人认为日调节水电站也属径流式水电站。径流式水电站中有高水头或低水头的引水式水电站,也有低水头的坝式水电站。

径流式水电站之所以不调节径流有两方面原因:①水库不具备相应的调节库容,没有能力调节。②虽有一定库容,但受综合利用要求制约而不调节径流。如建在中国长江上的葛洲坝水利枢纽,其水库总库容15.8亿 m^3 ,在枯水期本可进行日调节,但为适应下游航运要求而不调节径流。当上游三峡水利枢纽建成运行后,葛洲坝将不再作径流发电运行而承担反调节任务,即把三峡水利枢纽因调峰运行而放出的24h不均匀流量反调节成均匀流量出库以适应下游航运要求。

径流式水电站在24h内一般均匀发电,但当电力系统调峰能力不足时也可不均匀发电,即在负荷高峰时利用全部流量发电或机组满出力运行;在负荷低谷时相对减少发电出力,致使部分流量不通过机组发电而弃水出库。这种运行方式称为弃水调峰,由于弃水而未被利用的电量称为强迫弃水电量。

径流式水电站运行特点:①24h内出力基本不变,适宜担负电力系统的基底负荷。②年内各月电量变化大,枯水期电量明显少于汛期,为此使系统内火电站或其他电站要在汛期少发电,枯水期多发电,降低系统电源装机容量利用率。③弃水多,径流式水电站的水量利用系数一般较低,当上游有调节水库时,弃水会不同程度地减少。④坝式低水头径流式水电站的机组在汛期常因下游水位升高而发不足额定出力(见水电站设计水头),甚至不能发电。

(欧阳华)

jingliu suiji moxing

径流随机模型 (stochastic model of runoff) 用随机过程描述径流的理论和方法。

径流过程的性质 河川径流是复杂的过程,具有周期性和随机性。

(1)周期性。比较明显的为年周期,在一年中存在明显的丰枯交替的规律,与一年的季节相一致,所有河流无一例外。另外,还存在多年周期,但不像年周期那么明显。对年水量系列的方差分析,经过 F 检验(数理统计中显著性检验的一种方法),可以检验出不同长度周期的显著性,从而过滤出不同长度的多年周期,各电站的多年周期往往有较大的差别,可能是太阳黑子活动与大气环流的综合结果,如中国黄河长达11年的连续枯水期。

(2)随机性。是众多随机因素综合作用的结果。若将一年分为 T 个时段,时段序号为 t ,按顺时序排列,



$t=1,2,\cdots,T$,即使一年中相同时段(即时间相位相同)的流量,在不同年份里也是有较大变化的。这种随机性常用P-Ⅲ型概率分布来近似。

径流过程的随机描述 为了较确切地描述径流过程,常按一年中所分的时段(如将一年分为12个月),将连续的径流过程离散化,然后进行同时段径流的统计,这样处理能较好地反映径流的年周期特性和随机性。径流的连续性,则用时段间径流的相关系数来反映,为了简化,常用马尔科夫单链来表达,即只考虑相邻时段间径流的相关系数,实践证明,已能满足精度要求。多年周期可用年水量的自相关系数来表达,但由于多年周期较为复杂且牵涉因素较多,故常忽略不计。

用径流随机模型进行径流调节或水库调度时,对某一时段的径流处理,除必须考虑本时段径流处理的概率分布外,还必须考虑由某一时段某个状态转移到下一时段另一个状态的转移概率,设时段 $t+1$ 的径流以 Q_{t+1} 表示,则需建立 Q_{t+1} 依赖于 Q_t 的条件概率分布函数。这是二维的概型,常采用函数变换的办法,将P-Ⅲ型概率分布函数转换为正态分布函数,从而建立条件概率分布。方法步骤如下:

(1)将各年的 Q_t 和 Q_{t+1} 值分别进行数理统计,求得统计参数。均值、 C_v 和 C_s ;以P-Ⅲ型分布适线(拟合),求得各自的频率曲线;再分别与正态分布的频率曲线点绘在一张图上,根据各年 Q_t 和 Q_{t+1} 的值,按相同频率的原则,可求得各自函数变换后的取值,见图1。分别记为 Q'_t 及 Q'_{t+1},\cdots,Q'_t 和 Q'_{t+1},\cdots 均服从正态分布。

(2)计算 Q'_t 及 Q'_{t+1},\cdots 的刚性相关系数 r ,从而建立 Q'_{t+1} 倚 Q'_t 的条件概率分布,令

$$u=(Q'_{t+1}-rQ'_t)/\sqrt{1-r^2} \tag{1}$$

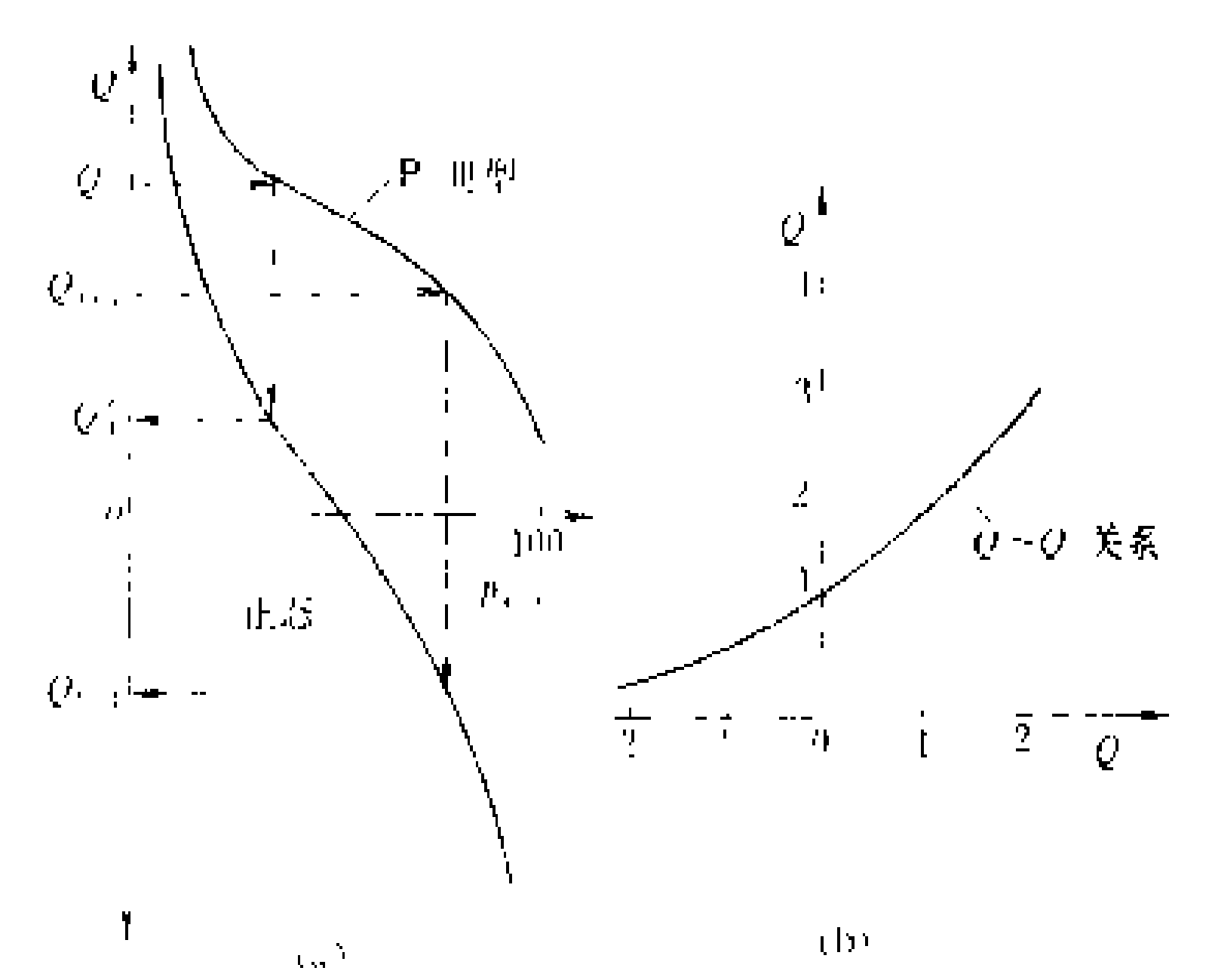


图1 P-Ⅲ型与正态型函数变换及函数关系图
(a)函数变换;(b)函数关系

则其概率密度为

$$f(u)=\exp(-u^2/2)/\sqrt{2\pi} \tag{2}$$

条件概率公式为

$$P_{ij}=\int_{(u_j-u_{j-1})/2}^{(u_{j+1}-u_j)/2} f(u)du \tag{3}$$

式(3)为正态分布条件概率公式。式中 P_{ij} 为 Q'_t 处于状态 $Q'_t(i)$ 时, Q'_{t+1} 处于状态 $Q'_{t+1}(j)$ 的转移概率。

(3)假定径流离散为 n 个状态,当 Q_t 处于状态 $Q_t(i)$ 时,由函数关系可求得正态型函数值 $Q'_t(i)$;若 Q_{t+1} 处于状态 $Q_{t+1}(j)$,也可求得正态型函数值 $Q'_{t+1}(j)$;由是求得相应的 u 值。从而按式(3)求得 P_{ij} 值,即为当时段 t,Q_t 为状态 $Q_t(i)$ 时,到时段 $t+1,Q_{t+1}$ 状态为 $Q_{t+1}(j)$ 的转移概率。对 n 对 i,j 值进行以上的计算,即可得到转移概率矩阵

$$P=(P_{ij}) \quad \begin{matrix} i=1,2,\cdots,n \\ j=1,2,\cdots,n \end{matrix} \tag{4}$$

且

$$\sum_{j=1}^n P_{ij}=1 \tag{5}$$

见图2。

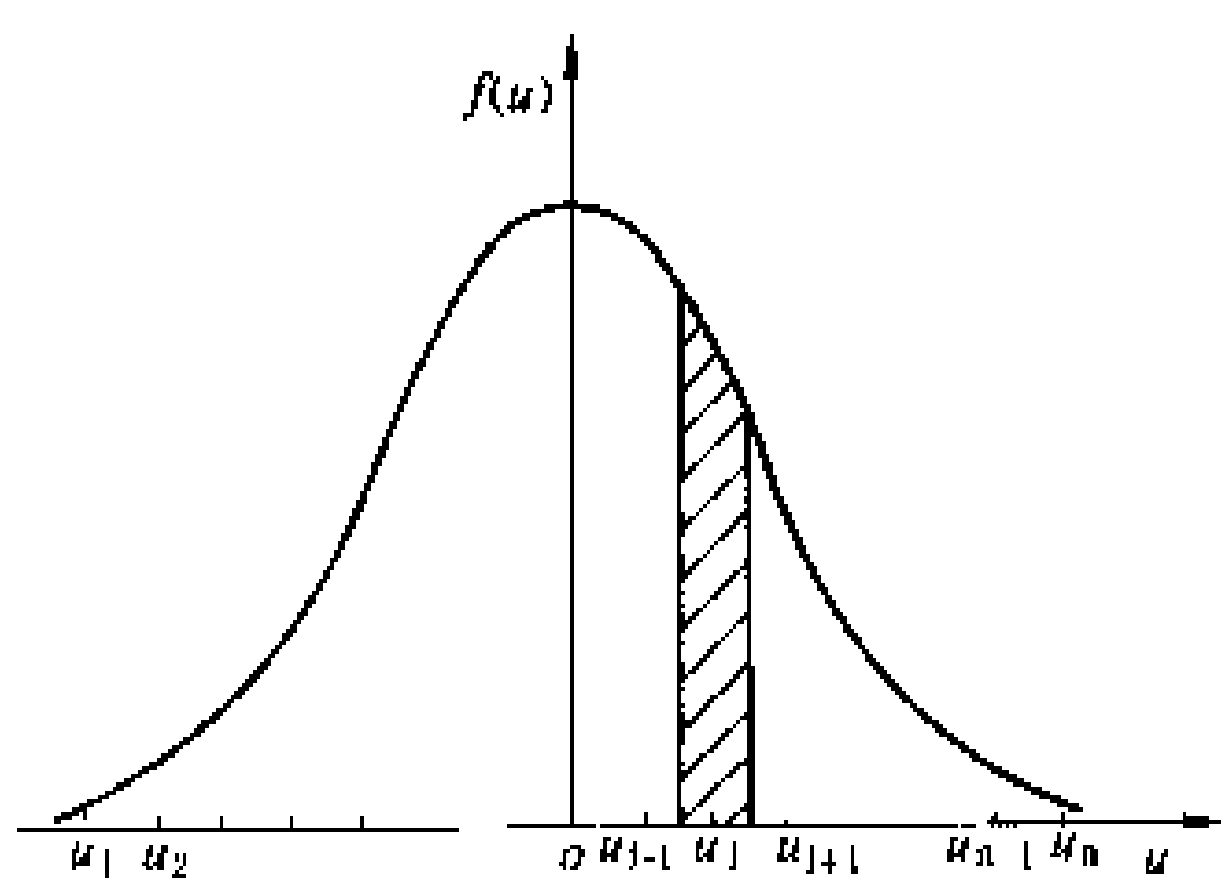


图2 Q'_{t+1} 条件密度函数及数值积分图

有人建议回归直线的误差,宜按弹性相关处理,并用Gamma分布。

参考书目

张勇传等. 优化理论在水库调度中的应用. 长沙: 湖南科学技术出版社,1985

(伍宏中)

径流调节

(regulation of runoff) 利用水库或湖泊(天然水库),按发电、防洪和其他综合利用水资源的要求,改变河川径流时空分布的理论和方法。水电站水库的径流调节,在改变河川径流时空分布时,也同时改变水能的时空分布。河川水流的丰枯周期变化及其随机性,常不能适应发电、防洪及其他水资源利用

部门的要求,需要进行径流的时空再分布。径流调节的基本途径是利用水库的容积和泄流设施储存和泄放水量,通过调节周期的水量平衡,进行水库运行的决策,从而改变径流及水能的时空分布,达到合理地满足发电、防洪及其他水资源综合利用用户要求的目的。经过水库调节以后,较能适应水资源用户要求的流量,叫做调节流量。

种类和要求 根据服务对象不同,径流调节可分为发电径流调节、洪水调节和为其他综合利用部门进行的径流调节。根据水资源综合利用各用户的特点,对径流调节提出了不同的要求。

(1) 发电径流调节。河川天然径流在年季间变化较大,在一天内则较稳定。电力用户的用电特性则相反,在年季间变化相对较小,在一天内变化较大。发电径流调节是利用水库把某些时期相对多余的来水量蓄存起来,在相对缺水时补给用以发电,以适应电力系统的需求。发电径流调节计算又叫做水能计算。

(2) 洪水调节。水库为下游防洪及保坝,在汛期拦蓄洪峰,当出现与下游防洪区防洪标准相应的洪水时,使下泄流量与区间流量(当有支流加入时)汇合后不大于下游防洪区的安全泄量,以免下游洪灾。当出现较稀遇的洪水时,允许在水库安全范围内超蓄,并加大泄量,以保证大坝安全。

(3) 其他综合利用(含航运、灌溉、供水、环境保护及旅游等)径流调节。①航运要求库内或下游河道在通航季节维持一定的水位以保持航深,并要求流速和水位变率不大于某一限度,故对重要的航运河段,还要进行明渠不恒定流计算。②灌溉要求合适的取水高程,并在农作物需灌水季节(旱季),放水灌溉。③供水(主要是城镇工业和居民生活用水)要求一年各季均匀供水,并有较高的水质要求。④环境保护(含渔业等)及旅游等主要是对水位和水深的要求。(见综合利用水库径流调节)

径流调节的各用户,均应有各自的保证率,一般以城镇供水最高,发电、航运次之,灌溉及其他部门较低。

水电站径流调节的特点 其特点主要包括两方面。

(1) 水能的要素为流量和水头。在径流调节过程中,水库的充蓄和消落直接导致库水位的变化,水库长期维持高水位,固然可取得较大的水头,但由于未充分利用库容调节径流,增加枯水期的调节流量,对增加保证出力和年发电量,都是不利的;相反,若水库水位过度消落,虽常可取得较大的枯水期调节流量,但由于低库水位导致水头的降低,也可能使保证出力和发电量减少。故水电站径流调节,必须全面照顾调节流量和水

头的利用,进行有利的决策。

(2) 水电站的水库即能库。水电站消落调节库容(不含防洪库容,或称兴利库容、有效库容)而增加的调节流量与本电站及其下游梯级电站利用的总水头而形成的能量,叫做水库蓄能。水库蓄能可较全面地体现水电站水库的调节作用。在考虑河流梯级开发方案时,应尽量将水库布置在上游,以取得较大的控制水头,增加水库蓄能,从而增加调节能力;当水电站开发方式及水库容积已定时,水电站的径流调节的任务就是最有利地利用其蓄能,以取得最大的发电效益。

水库调节性能 水库调节周期为水库从库满到放空再蓄满(或从库空蓄满再放空)所需的时间。水库调节性能(不含洪水调节),按其调节周期长短可分为日调节、周调节、季(年)调节和多年调节四种。在径流特性相同的情况下,调节周期越长需要的调节库容越大,发电效益也越大。具有较长期调节性能的水库也同时具有较短期调节的性能。

(1) 日调节。水库的调节库容可在每天将低负荷时多余的水蓄起来,在高负荷时用,调节周期为一天。

(2) 周调节。除进行日调节外,还可在每周将用电负荷降低时(如周末)多余的水蓄起来,增加在高负荷时(如工作日)的发电流量,调节周期为一周。

(3) 季(年)调节。在每一年中蓄存丰水期多余的水量供枯水期用,以提高枯水期的出力,其调节周期为季(年)。

(4) 多年调节。能将若干丰水年的多余水量蓄存起来供枯水年或若干连续枯水年使用,调节周期在一年以上。

水库的调节性能,常以库容系数 β 来表达, β 为调节库容除以水库平均年来水量之商, β 值越大调节性能越好;水电站也可以用水库蓄能除以水库平均年来水能量的商值(含下游梯级)来表达。

径流调节计算 径流调节计算的任务和目的,是在满足各项约束条件的前提下,为最大限度地满足发电、防洪及其他综合利用的要求,在调节周期内进行水量及能量平衡计算,从而进行水库运行的决策,并模拟水库未来运用情况,计算出调节效益指标及水库运行特性,作为规划、设计的基础及为水库建成后的运行作参考。径流调节的基本依据是河川的径流资料,而河川径流具有周期性、随机性和不重复性。按对径流过程的处理方法不同,径流调节计算方法可分为时历法、数理统计法和随机过程法三类。

(1) 时历法。以径流的周期性为基础,按确定型(即历史径流重演)的假定来处理径流资料。用实测(有时还加插补延长)径流系列作为基础资料,进行逐



时段的调节计算。其优点是简单直观,且易于进行各种复杂情况(如综合利用、水库群补偿等)的调节计算,可求得出力、水头、库水位和调节流量的过程线,在规划设计中得到较广泛的应用。缺点是当实测径流的年限较短时,影响计算成果的代表性。(见时历法径流调节)

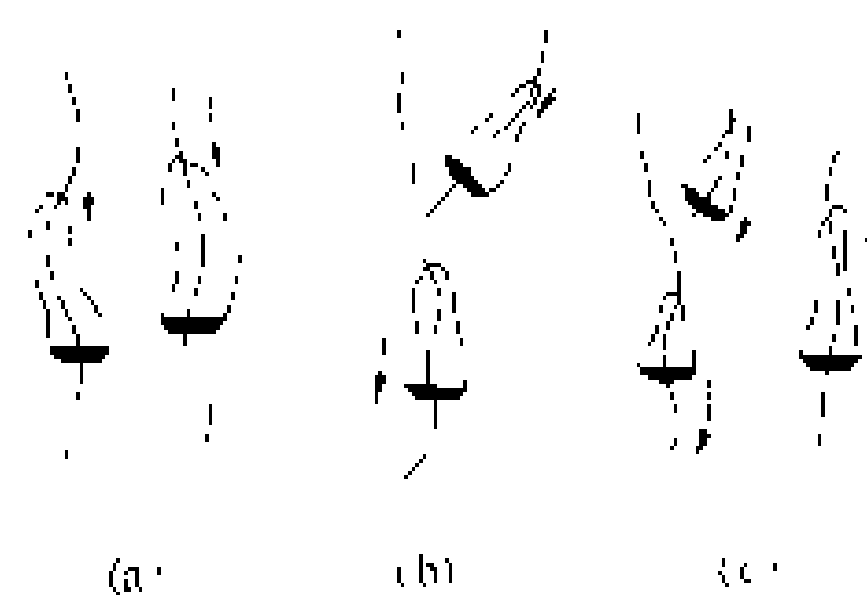
(2)数理统计法。用实测的径流系列资料,求出年平均流量的多年统计参数(均值、离差系数、偏差系数和年际的相关系数,见水文频率分析),并利用这些参数进行概率组合演算,求得调节流量。多用于多年调节水库。其优点是能较好地反映径流的随机性,并可在一定程度上解决实测径流资料短缺的问题。当实测径流资料短缺时,可借用邻近河流的径流统计参数进行多年调节计算。缺点是难以求得出力、水头、库水位和调节流量的过程特性;对综合利用、跨流域补偿调节计算,无论在理论上还是方法上均存在较大的困难;把连续的径流过程,作为孤立的随机变量对待也有一定缺陷。(见数理统计法径流调节)

(3)随机过程法。本方法对径流过程又有两种处理方法,即马尔科夫链和径流系列人工生成法。前者是根据实测径流系列资料,求得本时段径流的概率分布,并根据与前若干时段径流的相关系数,建立起本时段与前若干时段径流的条件概率,据此建立起联合概率分布,从而得到本时段径流的无条件概率分布,据以进行径流调节的演算。一般常用马尔科夫单链来描述径流(仅建立与前一时段的径流相关关系),并用动态规划作马尔科夫决策,进行径流调节,较广泛地用于已成电站的水库优化调度。后者是对实测径流系列进行数理统计,求得其统计参数,再用随机模拟的方法[如蒙特卡罗(Monte Carlo)法]生成年限很长的人工径流系列(如500~1000年或更长),然后用时历法做径流调节计算。随机过程在理论上较严密,但计算工作量很大,需要很大的计算机内存空间和很长的机时。对水库群补偿调节,涉及多维概率模型,理论和方法还不成熟,故尚处于探索阶段。(见水电站水库优化调度及径流系列人工生成)

水电站群的径流调节 水电站群有三种类型:①无水力联系,各水电站不在一条河上,即跨流域水电站群,见图(a)。②有水力联系,即水电站梯级,上游电站下泄的流量流入下游梯级电站,见图(b)。③混合式,兼有上述两种类型的水电站群,见图(c)。

水电站群的联合运行,具有“群”的增益,这种增益来自水文补偿和水库补偿。水文补偿是指电站间的水文不同步性(即各电站在同一时间,流量丰枯的程度不同)而引起的自然补偿作用,与水库运行无关,跨流域水电站群,可能有此类效益。水库补偿是指水库群的

径流调节,以电站间按出力或流量的余缺调剂的方式运行,以综合出力满足系统的电力电量的需求,这种调节叫补偿调节。以出力的余缺进行调剂的叫做电力补偿调节,用于有电力联系的水电站群;以径流的余缺进行调剂的叫做径流补偿调节,用于有水力联系(水电站梯级)的电站群。



水电站群简图

(a) 无水力联系; (b) 有水力联系; (c) 混合式

水电站群的径流调节,必须以水电站群总发电效益最大为原则,制定各电站的运行方式,进行水量和能量的平衡(见水库群补偿径流调节)。

反调节 当上游水库按某综合利用用户用水要求进行调节时,因不能适应下游其他综合利用用户的需要,而必须进行的径流重新调节。如发电日调节造成下游日内不均匀流量,影响下游通航或灌溉、供水等,而需用水库将不均匀来水调匀,以适应下游有关综合利用用户的要求。

发展简史 19世纪80年代欧美开始发展水电,20世纪初美国开发哥伦比亚河支流水电站。在此期间,径流调节理论即已萌芽。20世纪20年代至30年代,美国、苏联、德国、法国相继修建大型水电站,由于实际需要,逐渐形成了以简单求算为基础的径流调节理论。30年代,美国学者A.哈仁(A. Harzen)、苏联学者С. Н. 克里茨基(С. Н. Крицкий)与М. Ф. 明凯里(М. Ф. Менкель)等人在总结前人经验的基础上发表了若干有关径流调节的论文后,径流调节才作为一个专门学科进入科学范畴。30年代以后,苏联学者发表了不少专著,其中以克里茨基和明凯里于1953年所著的《水利计算》最有代表性。

径流调节科学的发展,始终与河川径流的描述结合在一起。起初,对河川径流都是按确定型处理的。20世纪30年代,克里茨基与明凯里提出了多年调节的数理统计法。1940年苏联的А. Д. 萨瓦连斯基(А. Д. Саваренский)发展了该方法,Я. Ф. 普列什科夫(Я. Ф. Плещков)则提出了更实用的线解图。50年代,国外许多学者提出按随机过程描述径流过程的思想。苏联学者Н. А. 卡特维利什维利(Н. А. Картвелишвили)用连续过程处理径流,用变分法计算得到了结果。1955年美国的J. D. C. 利特尔(J. D. C. Little)用马尔科夫

链描述径流过程,用动态规划法求得大古力水电站最优调度方案。还有其他许多学者也作出了贡献。苏联的 A. A. 莫罗佐夫 (A. A. Морозов) 提出水库调度图指导水库运行,С. И. 倪克勤 (С. И. Никитин) 发展了这种方法,将径流调节与水库运行调度结合起来的水库调度图及其制作方法,得到广泛应用。

现代,对水资源的开发利用的要求越来越高。径流调节所涉及的范围从过去的单库调节发展到梯级及跨流域的多库联合补偿调节,从过去的单一目标的调节发展到多目标综合利用的调节,从单纯水电运行调度发展到按电力系统要求进行水火电联合运行调度。最优化和多目标决策的理论也开始在径流调节中得到应用。

中国从 20 世纪 50 年代初开始径流调节的研究工作,经过 40 多年的实践,发展较快,研制了许多实用模型,尤其是在水库优化调度和梯级、跨流域水库群补偿调节方面建立了多种各具特色的模型。径流过程的处理,有确定型的,有随机型的。计算方法有常规方法,如调度图和判别式法;有优化方法,如动态规划、线性规划、非线性规划和逐步优化算法 (POA)。并在制定水电站水库群联合调度规则方面有所创新。

(朱藻文 伍宏中)

jingliu xilie ren'gong shengcheng

径流系列人工生成 (synthetic generation of runoff series) 根据实测径流统计参数,用统计试验法[蒙特卡罗 (Montecarlo) 法],将实测径流系列人工生成包括各种可能组合的长径流系列的技术。其目的是为弥补由于实测径流系列长度有限而导致的代表性不足的缺点。径流系列的生成在时间上主要是年、月径流,在空间上有单站和多站。径流时间序列通常由确定性分量和随机分量两部分组成。确定性分量又分周期分量和非周期分量(又可分趋势项和突变项),随机分量又分随机相依分量和纯随机分量。径流系列组成的表达式如下

$Q_t = P_t + T_t + S_t + \eta_t + \varepsilon_t (t = 1, 2, \dots, N)$ (1)
式中下角标 t 为时段序号; P_t 为周期分量,是由太阳活动、地球自转等星球活动所导致的不同时期的周期性变化; T_t 为非周期分量的趋势项,指径流在均值意义上随时间增长呈稳定且有规律的位移; S_t 为非周期分量的突变项,指由于上游水库蓄水或大坝溃决引起径流的突然变化; P_t 、 T_t 、 S_t 统称为确定性分量。 η_t 为随机分量的相关随机项,表示径流在时间序列上存在着相关性,即当年与前一年,或当年与前二年,……,之间存在相关关系; ε_t 为随机分量的纯随机项,表示不存在相关关系。

上述参数是由实测径流系列求得的均值 \bar{Q}_0 、离差系数 C_v 、均方差 σ 、偏差系数 C_s 和相关系数 r 等样本参数,通过推导出其他各种各样的子公式求得的,代入 (1) 式进行系列生成。但样本特性不同,式 (1) 中不是每一项都有,主要通过样本系列进行分析而定。

单站年径流随机模型 在单站年径流系列生成中的随机模型可分为纯随机模型、线性自回归模型、滑动平均模型和自回归滑动平均模型。

(1) 纯随机模型。这是一种最简单的随机过程模型,适用于各年径流量具有同一概率分布函数,且相互独立的情况。

(2) 线性自回归模型。又分为一阶线性自回归模型和 p 阶线性自回归模型。一阶线性自回归模型亦称马尔科夫模型,是指随机变量的当年年径流 Y_t 是前一年年径流量 Y_{t-1} 和一个随机量 η_t 的线性组合,即

$$Y_t = \rho_1 Y_{t-1} + \eta_t \quad (2)$$

式中 ρ_1 代表滞时为 1 的自相关系数, $-1 < \rho_1 < 1$ 。 p 阶自回归模型是指作为随机变量的当年年径流是由选定的 p 个过去历史年径流和一个随机量的线性组合。

(3) 滑动平均模型。年径流量序列经标准化后得出当年变量值 Y_t 。 Y_t 为 $q+1$ 个随机量的权重和,对当年随机量,其权重为 1,对以前各年的随机量,其权重为 θ_j ,其模型表达式为

$$Y_t = \eta_t - \theta_1 \eta_{t-1} - \dots - \theta_q \eta_{t-q} - \eta_t \sum_{j=1}^q \theta_j \eta_{t-j} \quad (3)$$

式中 θ_j 为前 j 年随机量 η_{t-j} 的权重数; q 为滑动平均模型的阶数。

(4) 自回归滑动平均模型。它是由自回归模型和滑动平均模型相结合的一种弹性更大的模型。

单站月径流随机模型 月径流系列生成的随机模型分自回归模型和分解模型两类。

(1) 自回归模型。自回归模型又分月径流马尔科夫模型和月径流逐步回归模型。马尔科夫模型实质上是一阶自回归模型,其基本方程式为

$$\left. \begin{aligned} Q_{i,j} &= \bar{Q}_j + \rho_j (Q_{i,j-1} - \bar{Q}_{j-1}) + \zeta_j \sigma_{e,j} \\ (i &= 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, 12) \\ \rho_j &= r_{j,j-1} \frac{\sigma_j}{\sigma_{j-1}} \\ \sigma_{e,j} &= \sigma_j \sqrt{1 - r_{j,j-1}^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 $Q_{i,j}$ 为 i 年 j 月的径流量; \bar{Q}_j 、 \bar{Q}_{j-1} 为 j 月和 $j-1$ 月的月径流均值; $r_{j,j-1}$ 为 j 和 $j-1$ 月的月径流之间的相关系数; σ_j 、 σ_{j-1} 为 j 和 $j-1$ 月的月径流均方差; ζ_j 为 j 月标准正态分布的随机数; $\sigma_{e,j}$ 为 j 月随机项 ε_j 的均方差。

(2) 分解模型。分解模型又分年分配模型和解集

jing 静

模型。

多站年径流随机模型 多站年径流随机模型为一阶自回归模型可看成是单站一阶自回归模型的推广，与单站一阶自回归模型公式类似。其模型为

$$Y_t=AY_{t-1}+B\zeta_t \tag{5}$$

式中 Y_t, Y_{t-1} 为 $t, t-1$ 年 m 个站标准正态化后的年径流随机向量，即

$$Y_t=(Y_{1t}, Y_{2t}, \cdots, Y_{mt})^T$$
$$Y_{t-1}=(Y_{1,t-1}, Y_{2,t-1}, \cdots, Y_{m,t-1})^T$$

式 (5) 中 ζ_t 为 t 年的 $m \times 1$ 维相互独立标准正态随机向量，即

$$\zeta_t=(\zeta_{1,t}, \zeta_{2,t}, \cdots, \zeta_{m,t})^T$$

A, B 为两个 $m \times m$ 的参数矩阵，将式 (5) 两边经转置、展开，因 ζ 与 Y 相互独立， $\zeta \cdot \zeta^T=E$ (单位矩阵)，简化后得

$$A=S_{y_1 \cdot y_{t-1}} \cdot S_{yy}^{-1}$$
$$BB^T=S_{y \cdot y}-S_{y_t \cdot y_{t-1}} \cdot S_{yy}^{-1} \cdot S_{y_t \cdot y_{t-1}}^T$$

其中

$$S_{y_t \cdot y_{t-1}}=E(Y_t Y_{t-1}^T)=\begin{bmatrix} r_{1,1}^{(-1)} & r_{1,2}^{(-1)} & \cdots & r_{1,m}^{(-1)} \\ r_{2,1}^{(-1)} & r_{2,2}^{(-1)} & \cdots & r_{2,m}^{(-1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m,1}^{(-1)} & r_{m,2}^{(-1)} & \cdots & r_{m,m}^{(-1)} \end{bmatrix}$$
$$S_{yy}=E(Y_t Y_t^T)=\begin{bmatrix} 1 & r_{1,2}^{(0)} & \cdots & r_{1,m}^{(0)} \\ r_{2,1}^{(0)} & 1 & \cdots & r_{2,m}^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1,m}^{(0)} & r_{2,m}^{(0)} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

式中 $r_{i,j}^{(-1)}$ 为 t 年第 i 站与 $(t-1)$ 年第 j 站年径流交叉相关系数； $r_{i,j}^{(0)}$ 为同年第 i 站与第 j 站年径流相关系数。

多站月径流随机模型 多站月径流生成随机模型可以看成是单站月径流生成解集模型的推广，与单站月径流模型相似。其模型为

$$Y_m=AY+B\zeta \tag{6}$$

式中 Y 为变换为标准正态分布 $N(0, 1)$ 的 N 个站的年径流向量， $Y=(Y^{(1)}, Y^{(2)}, \cdots, Y^{(N)})^T$ ； Y_m 为变换为标准正态分布 $N(0, 1)$ 的 N 个站 12 个月径流的 $12 \times N$ 维向量 $Y_m=(Y_1^{(1)}, Y_2^{(1)}, \cdots, Y_{12}^{(1)}; Y_1^{(2)}, Y_2^{(2)}, \cdots, Y_{12}^{(2)}; \cdots; Y_1^{(N)}, Y_2^{(N)}, \cdots, Y_{12}^{(N)})$ ； ζ 为 $12 \times N$ 个独立标准正态随机向量； $Y^{(i)}$ 为 i 个站年径流随机变量； $Y_j^{(i)}$ 为 i 个站第 j 个月月径流随机变量； A 为 $12N \times N$ 矩阵； B 为 $12N \times 12N$ 矩阵。 A, B 的表示式与式 (5) 变换的 A, BB^T 相仿。

径流系列人工生成技术 径流系列生成技术便是通过生成服从径流随机分布函数的随机数并借助于不

同的随机模型进行人工生成径流时间系列的方法。在生成过程中，需要生成服从于一定概率分布函数的大量随机数列。从理论上讲，任何一种随机分布的随机数，都可以通过多种转换方法，产生其他任意分布的随机数。由于 $(0, 1)$ 区间上的均匀分布是简单而且是最基本的连续分布，所以通常都先生成 $(0, 1)$ 上均匀分布的随机数系列，然后再转换成欲求分布的随机数列。

参考书目

华士乾主编. 水资源系统分析指南. 北京: 水利电力出版社, 1988

Kottegoda NT. Stochastic Water Resources Technology. London: Macmillan Press LTD, 1980

(许自达)

jing kurang

静库容 (static storage volume of reservoir)

见动库容。

jubu fangdian fenxi

局部放电分析 (analysis of partial discharge) 检测电气设备绝缘内部是否存在局部放电的一种试验方法。高压电气设备绝缘内部若存在空隙、气泡、杂质、外伤等，或在绝缘的沿面上具有缺陷，在电场强度达到一定值时，就会发生局部放电。这种局部放电产生的热和活性气体，会腐蚀局部绝缘，造成绝缘介质性能的逐步老化，由于累积效应，最终可能使整个绝缘击穿和闪络。电气设备局部放电试验，可分析区别局部放电的特征，测出它的放电强度。其测量试验方法有噪声检测法、光测法、热检测法、放电产物分析法、无线电干扰测量法、脉冲电流测量法，再根据试验结果，进行分析判断。

测量试验方法

- (1) 噪声检测法。在电气设备接地外壳上用加速度传感器，将局部放电产生的超声振动检出，经过信号放大或滤波，再用指示仪表或示波器显示放电的强弱。其优点是结构简单，抗空间电磁干扰能力强，可利用声波具有方向性的特性，进行局部放电定位。
- (2) 光测法。用光倍增管测量局部放电，其特点是信号传输效应极快，不受外界干扰，又能与高电压测试系统可靠地绝缘，且便于确定放电位置，因此，适用于表面放电和透明绝缘内部放电过程的研究。
- (3) 热检测法。测量局部放电引起的温升，确定局部放电的部位，此法既不灵敏，又不能定量。
- (4) 放电产物分析法。它是分析局部放电时所产生的化学气体量，来决定放电程度，多适用于气体绝缘和液体绝缘的局部放电分析，例如绝缘油色谱分析。

(5) 无线电干扰测量法。它是用无线电干扰仪来检测由于局部放电时对无线电通信的干扰，此法在国际上使用得比较普遍，对气体中的放电检测，有较高的灵敏度，但对放电形成时间较长的油中局部放电，检测灵敏度显著下降。

(6) 脉冲电流测量法。它是使高压设备的局部放电，在试验回路中，产生高频电流脉冲，并经过检测阻抗，产生电压脉冲，经过合适的、带宽放大器放大后，由仪器测量放电电荷，这是目前应用最广泛的一种方法。

分析判断 目前国际上普遍采用的局部放电测量方法，只有两种：无线电干扰测量法（RIV 法）和脉冲电流测量法（ERA 法）其分析判断标准，在国际电工委员会 IEC-270 标准都有明确的规定，它对于不同种类的高压电气设备规定了不同的测试回路和局部放电标准。

发展动向 一般惯用局部放电测量系统在试验过程中仅能记录有限的数，而且在测量中常常受到测量条件的影响，往往使有些有用数据被遗弃，给进一步分析和判断造成困难，微机技术的应用，将能克服在局部放电测试中的上述缺点。目前，国内外在应用微机配合局部放电检测仪的功能方面，主要有：①处理和分析数据，降低测量误差。②区别并分离局部放电信号和外界干扰，进而实现局部放电自动检测、诊断并预测绝缘质量。

（黄宣范）

jueyuanyou sepu fenxi
绝缘油色谱分析（gas chromatographic analysis of insulating oil） 采用气相色谱法分析绝缘油中溶解气体的含量，以检测充油电气设备内部潜伏性故障的诊断方法。气相色谱法是用气体作为流动相的色谱法。充油电气设备在出现故障时，绝缘材料发生分解，析出气体，它们完全或部分地溶解于油中，这些气体是甲烷、乙烷、乙烯、乙炔、氢气、一氧化碳和二氧化碳等。油中溶解气体的数量，是衡量是否有故障的标志。气体的组成，标志着故障类型，基本上与油品无关，检测周期由故障类型、气体浓度、设备容量以及产气速率等决定。

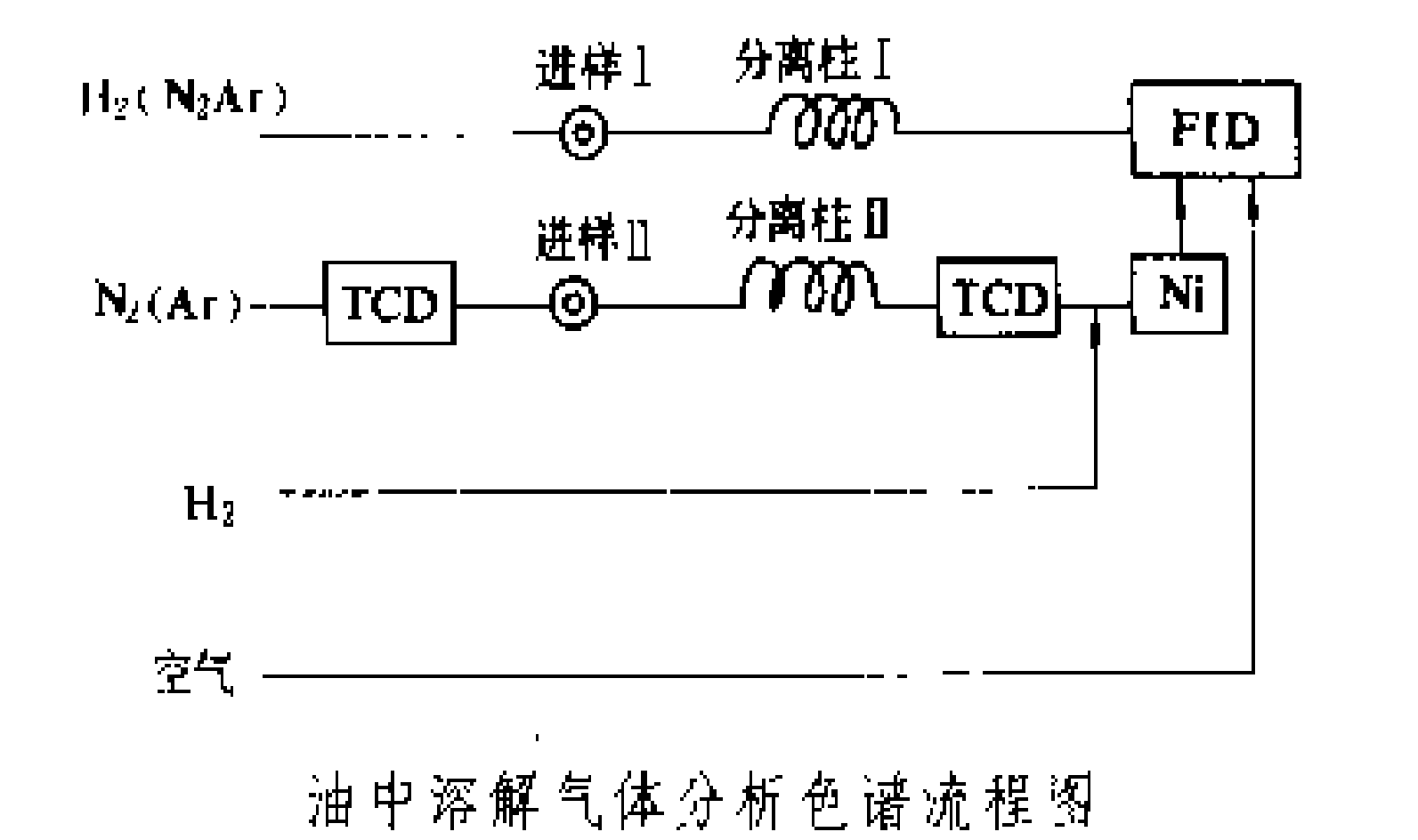
分析过程 分为取油样、脱气、色谱分析三个步骤。

(1) 取油样。电力变压器及电抗器可在运行中取样。当需要设备停电取样时，在停电后尽快取样。对于可能产生负压的密封设备，应防止负压进气。为了取得具有代表性的样品，采样时应采用带有小嘴的取样器，安装在设备的取样阀门上，排除取样管路中及取样阀

内的空气和油，同时，用设备本体的油冲洗管路，然后用玻璃注射器采样。

(2) 脱气。主要有托普勒泵脱气装置及机械振荡脱气装置。①托普勒泵脱气装置是通过玻璃过滤器将油喷入抽成真空的喷油容器中，油中溶解气体即逸出，接着由托普勒泵将气体抽出，并打入真空集气瓶。②机械振荡脱气装置是基于顶空色谱法原理，即在一个容器里，加入一定量的油样和纯气体（如氮气或氩气），在一定温度下，使油中溶解气体在气液两项达到分配平衡，取出气体分析后，利用道尔顿-亨利定律，计算出油中原来气体各组分的浓度。

(3) 色谱分析。装有热导检测器（TCD）和氧火焰离子化检测器（FID）的任何类型的气相色谱仪，均能用于油中溶解气体的分析。色谱仪中使用高纯度载气，如氩气（Ar）和氮气（N₂），载气依次通过调节系统、气样注入器、分离柱、镍催化剂（Ni）和检测器。镍催化剂的作用是将气体中的 CO 和 CO₂ 转化为 CH₄。在气体注入器中，被测气体进入载气流，在分离柱内被分离，并先后进入检测系统，同时发出信号，并用色谱图记录下来，根据各种气体组分峰的保留时间，识辨出气体组分，再根据峰面积，确定气体的含量。油中溶解气体分析色谱仪流程见图。



判断标准 在世界范围内进行统计表明，对判断标准作出绝对的结论，现在尚不可能，但如果气体组分超出相应的浓度值，即应怀疑电气设备是否良好。

中国水利电力部 1986 年颁发的《变压器油中溶解气体分析和判断导则》规定，运行中设备内部油中气体含量超过表 1 所列数值时，应引起注意。

表 1 油中溶解气体含量的注意值		
设 备	气体组分	含量 (μl/l.)
变 压 器 和 电 抗 器	总 烃	150
	乙 炔	5
	氢	150
互 感 器	总 烃	100
	乙 炔	3
	氢	150
套 管	总 烃	100
	乙 炔	5
	氢	500

jue 掘

绝对产气速率和相对产气速率是考察故障发展趋势的两种方式，绝对产气速率是每运行小时产生某种气体的平均值，当绝对产气速率超出表 2 时，应进行追踪分析。

表 2 总烃产气速率的注意值

相对产气速率是运行日某种气体含量增加与原有值的百分数的平均值，总烃的相对产气速率大于 10% 时应引起注意。	设备型式	开放式	隔离式
	产气速率(ml/h)	0.25	0.5

故障性质的判断是采用国际电工委员会(IEC)的三比值判断法，见表 3、表 4。

表 3 三比值法的编码规则

特征气体的比值	比值范围编码		
	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
<0.1	0	1	0
0.1~1	1	0	0
1~3	1	2	1
>3	2	2	2

表 4 判断故障性质的三比值法

比值范围编码			故障性质
$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	
0	0	0	无故障
0	1	0	低能量密度的局部放电
1	1	0	高能量密度的局部放电
1→2	0	1→2	低能量的放电
1	0	2	高能量的放电
0	0	1	低于 150℃ 的热故障
0	2	0	150~300℃ 的热故障
0	2	1	300~700℃ 的热故障
0	2	2	高于 700℃ 的热故障

(王应高)

juejinji kaiwa

掘进机开挖 (excavation by tunnel boring machine) 用专用的掘进机械进行地下圆形隧洞开挖的施工过程。用隧洞掘进机开挖时，不需要常规的钻孔爆破手段。专用机械自备液压支撑将机身支撑在洞壁上，然后推进机构以强大推力将旋转刀盘上的盘型滚刀楔入开挖岩面，切割破碎剥落岩体，同时刀盘上的装渣铲斗将剥落岩屑铲起并卸入出渣的带式输送机，再由带式输送机转卸入运输工具运出洞外。

隧洞掘进机的特点，是从破碎岩层至出渣多种工序的综合机械化联合作业全断面迈步式连续掘进。它

与钻爆法相比具有掘进速度快，费用低，对围岩扰动少，围岩松散区厚度相对减小，对水工隧洞承受内水压力的能力相对较大，而且洞壁匀整，超挖量极小和操作安全等优点。但掘进机械成本高，刃具损耗大，在坚硬岩体或隧洞长度较短时使用就不经济，而且一台掘进机械一般只适用一种直径的圆形断面，其他形状或直径的隧洞均不适用，在掘进中遭遇不良地质或溶蚀地层，也不能适应多变的地质构造。

根据掘进机的制造水平，目前在中等强度岩体，地下涌水量不大，溶洞不甚发育，洞长超过 3 km 或 600 倍洞径，直线或弯道半径大于 200 m，洞径 3~10 m 的圆形隧洞较为适用。在掘进机施工前，洞口要有适当平坦场地组装设备，先用钻孔爆破法挖出一段隧洞，浇筑混凝土底板和两侧边墙，也可不挖隧洞在洞口直接浇筑混凝土侧墙，长度大于掘进机刀盘到支撑靴板后缘的距离，以支承掘进机的支撑靴板，然后修平工作面，掘进机方能就位工作。由于掘进机除在工作中更换行程和刃具需间歇外，其余时间都在连续工作，刀盘的滚刀直接将工作面岩体拉或剪切破碎，因此刀盘需要高压喷水冷却，耗水量按机械性能决定。其他供电、通风、照明、排水、通信、供水等设施与一般钻孔爆破法开挖隧洞一样。

隧洞掘进机开挖时的出渣强度较高，出渣采用无轨运输或有轨运输。①无轨运输，在隧洞底部用输出石渣铺垫车道，将带式输送机卸落的石渣用自卸汽车输出洞外，适用于洞径较大的隧洞。②有轨运输，在已掘进的洞底铺设铁道，将带式输送机卸落的石渣用电机车牵引矿车输出洞外，适用于纵坡较小的中、小隧洞。

隧洞掘进机自 1947 年美国试制连续式双钻头煤矿掘进机开始，1953 年首次制成全断面开挖的圆形隧洞掘进机，较成功地使用于工程量不大的隧洞开挖工程，以后逐年改进发展，成为专用的隧洞掘进机。

(王守道)

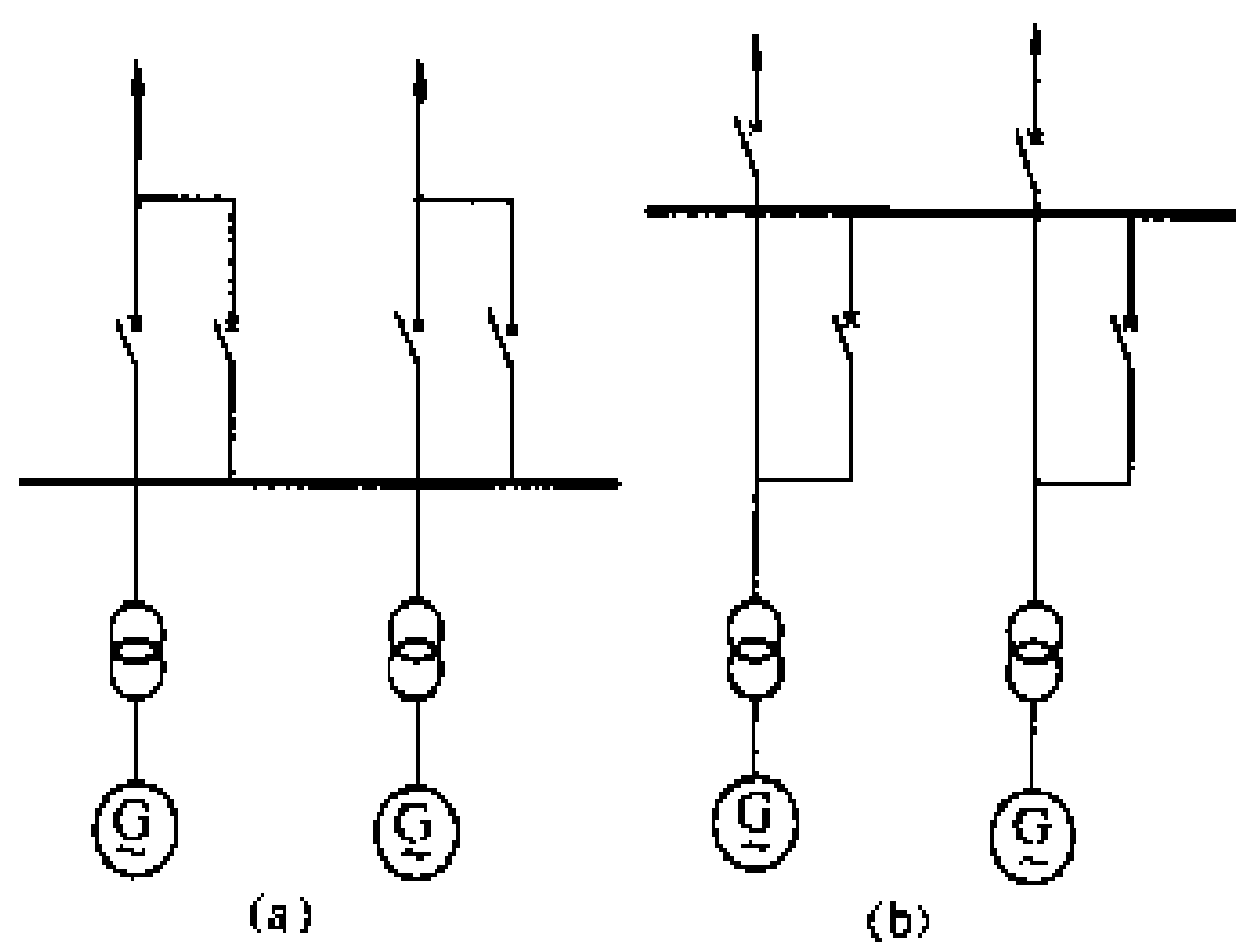
junheng muxian jiejian

均衡母线接线 (balance-bus connection)

每个发电机-变压器-线路组单元都经过另一台断路器接到一条公共均衡母线的电路。这种接线是由变压器-线路组接线演变而成，增设了均衡母线，可使各回路间电能均衡分配。也可认为是一个半断路器接线去掉一条母线和一台断路器的简化接线方式。按均衡母线断路器位置，可分为外均衡母线接线——均衡母线断路器接在线路侧和内均衡母线接线——均衡母线断路器接在变压器侧，分别见图 (a)、(b)。

这两种接线方式的共同优点是：①接线清晰。②布置简单。③运行方便，故障影响范围小，运行可靠性较

高,尤其对线路输送功率和发电机容量相当,或者输电线路基本送往同一方向或同一变电所时最为适用。共同缺点是:①灵活性差,均衡母线检修,全部解列成各自单独的发电机-变压器-线路组单元运行。②均衡母线上的断路器故障,除影响本回路变压器-线路组单元停电外,其他单元也将解列运行。



均衡母线接线

(a) 外均衡母线接线; (b) 内均衡母线接线

外均衡母线接线的优点是:①主变压器的投入或切除比较方便。②一台主变压器故障只开断一台断路器,不影响线路的运行。缺点是:①出线断路器检修将影响发电机-变压器组送电。②线路故障需同时开断两台断路器,并需满足并联开断的要求。

内均衡母线接线的优点是:①线路的投入或切除比较方便。②一回线路发生故障时,仅故障线路的断路器断开,不影响其他回路的运行。缺点则是:①一台主变压器故障,同时开断两台断路器,并切除一回线路。②主变压器的投入或切除需同时开断两台断路器,并影响线路的运行。

均衡母线接线一般适用于进出线回路数相同,出线负荷较稳定,且负荷基本与发电机容量相一致,并且电力系统允许按发电机-变压器-线路组单元运行的大中型水电站。当电站利用小时数较低,担负调峰任务,主变压器切合频繁时,一般采用外均衡母线接线。

(潘天缘)



karstite

喀斯特 (karst) 水对可溶性岩体以溶蚀为主的地质作用过程及其所产生各种现象的总称。中国亦称岩溶。可溶性岩石,在地表水和地下水的长期作用下形成各种奇特的喀斯特现象。喀斯特一词源出于南斯拉夫一处发育喀斯特现象的石灰岩高原的地名。中国及世界上可溶性的碳酸盐类岩石(石灰岩、白云岩)分布较广,在人类生活及经济建设活动中常常涉及到喀斯特问题。喀斯特景观绮丽,可作为旅游胜地。喀斯特地下水具有水量充沛、水质良好的优点,适宜灌溉、饮用及工业用水;还有一些矿产资源和矿泉与喀斯特有关。但是岩溶引起的渗漏、塌陷、突然涌水等问题往往给采矿和工程建设造成很大困难。工程建设中,喀斯特可能影响建筑物的稳定性、正常使用条件、施工方法及工程造价。研究喀斯特发育规律及其水文地质特征,对于工程建设具有重要意义。

喀斯特形成的基本条件 必须具有可溶性岩石、岩体(石)的透水性、水的运动及水有溶解能力等四个基本条件。

(1)可溶性岩石是喀斯特作用的物质基础,其岩石成分和结构特点影响喀斯特的性质和发展速度。按岩石成分,可溶性岩石可分为碳酸盐类岩石(石灰岩、白云岩及过渡岩);硫酸盐类岩石(石膏、硬石膏等);岩盐类岩石(岩盐、光卤石等)三类。其中岩盐类溶解度最大,硫酸盐类次之,碳酸盐类溶解度最小。在其他条件相同情况下,质纯的石灰岩比含有杂质的石灰岩、白云岩易于溶解。从岩石结构上,粗粒或多孔石灰岩要较细粒或隐晶质石灰岩易受溶蚀。

(2)岩体(石)的透水性有利于地表水渗入地下,促使喀斯特作用向深处发展。岩体(石)透水性取决于构造的发育程度及孔隙度。断层、裂隙及层面多为地下水循环的良好通道,是喀斯特发育的地带。岩石孔隙对喀斯特发育有一定影响,蜂窝状溶蚀孔洞系地下水沿孔隙长期循环活动的结果。

(3)水的运动能不断地将溶解物质带走,具有侵蚀性的水,使喀斯特不断发育。水的循环交替强度取决于

岩体透水性、排泄与补给条件及气候条件。

(4)水的溶解能力主要决定于水中碳酸的含量,即随水中侵蚀性 CO_2 增多而增强。水中侵蚀性 CO_2 来源于大气降水补给以及地表土壤的生物化学作用。

喀斯特形态 ①溶沟与石芽:溶沟为地表径流沿岩石表面或裂隙溶蚀的石质沟槽;溶沟间凸出的石脊称石芽,高大壁立的成片石芽通称石林。②溶斗:为漏斗状或碟状的封闭洼地,由溶蚀伴随塌陷等作用形成,底部常有充填物堆积。③落水洞:是地表或洼地底部通向地下溶洞或暗河的竖向洞穴,洞径大小不一,形态也不规则,有的成垂直的,有的成倾斜或曲折的。④溶洞与暗河:溶洞是地下径流溶蚀岩石而成的地下洞穴,规模不等,有管状、袋状、长廊状或厅堂状等。溶洞多连通成串,构成高低曲折、时宽时窄的地下廊道;沿地下溶洞形成的水流通道通称暗河,暗河中的水流称伏流。⑤溶蚀洼地与坡立谷:溶蚀洼地是底部较平坦、面积较大的盆状洼地,底部常有溶斗或落水洞分布;坡立谷为规模比溶蚀洼地更大的狭长形盆地,底面积可达几十乃至几百平方公里。谷地平坦,上覆有溶蚀残余的粘土及坡、冲积物等。通常有河流穿越盆地。⑥盲谷与干谷:地表河流沿落水洞流入地下,河谷前端突然中断的地形称盲谷;地表河流转入地下后,原河道干涸无水的河谷称干谷。⑦峰林:是成群分布的孤峰,多分布在盆地周边。

喀斯特发育规律

(1)喀斯特垂直分带性在垂直带的不同位置中,发育不同形态特征的喀斯特。包气带:自地表至地下水面之间,地下水以间歇性的垂直循环为主,主要形成落水洞、溶斗等垂直向或斜向的喀斯特形态;地下水位季节变化带:地下水运动为水平循环与垂直循环周期性交替,以水平循环为主,此带喀斯特作用强烈,主要形成水平溶洞、暗河等喀斯特形态;完全饱和带:水的运动受当地水文网排水作用影响,河谷两侧以水平循环为主,河谷底部自下向上流动。在地下水面附近形成近于水平的溶洞,河谷底部多形成规模不大的溶洞或溶孔;深层循环带:地下水运动不受当地水文网影响,循环交替缓慢,喀斯特形态多为蜂窝状溶孔。

(2)喀斯特不均一性。在同一喀斯特地区,喀斯特发育随地下水循环交替条件的差别及地壳运动的变化,具有明显的空间分带性。在水平方向上,排泄区附近喀斯特作用最为强烈,反映在河谷两岸喀斯特发育,向分水岭地区逐渐减弱;在垂直方向上,一般在当地侵蚀基准面(河谷谷底)以下喀斯特发育的程度有随着深度增加而逐渐减弱的趋势。由于地壳上升和相对稳定期的相间交替,常形成与阶地高程相对应的层状溶洞。

在可溶性岩与非可溶性岩交界处、断层带、裂隙交汇处,喀斯特常明显较其他地区发育。

喀斯特发育阶段 喀斯特发育过程与地壳运动密切相关,在地壳上升的情况下,经历幼年期、壮年期和老年期三个阶段。①幼年期,地表形成许多溶沟和石芽,溶斗和落水洞广泛发育,地表水系开始破坏,有的河道变为盲谷或干谷,地下暗河初步形成。②壮年期,溶斗和落水洞的发展和扩大,使地表形成溶蚀洼地和坡立谷。地下暗河不断发展,形成完整的地下水系。部分暗河由于顶部的崩塌变为明流。在此阶段地面起伏很大,形成峰林地貌。③老年期,地下暗河及溶洞的大量崩塌,形成了地表水系。溶蚀洼地与坡立谷不断加深,使谷底接近地下水水面形成沼泽或湖泊。峰林经溶蚀或塌陷仅残余一些孤峰和残丘。研究调查地区的喀斯特发展阶段及其发育历史,有利于掌握喀斯特发育的特点和分布规律。

喀斯特渗漏 在喀斯特地区修建水电工程会遇到因喀斯特而引起的库、坝区的渗漏问题。严重渗漏直接影响水库效益,甚至不能蓄水。渗漏还可能引起地基失稳而危及大坝的安全。因此在喀斯特地区修建水电工程,必须审慎研究,进行专门性的工程地质勘察。实践经验表明,正确地选择库坝址区,是保证建筑物安全和正常使用,减少防治工程,降低工程造价和缩短工期的根本性措施。在选择库坝址时,必须充分利用隔水层和有利的地质水文条件。如选择周边有隔水层或有高地下水分水岭地段建库;坝址选在有隔水层的横谷地段,有利于坝区的防渗。在无隔水层或有隔水层分布的纵谷地段建坝,要在充分掌握喀斯特发育规律和地质水文条件的基础上,分析其渗漏条件、可能的渗漏类型及渗漏地段的范围,并进行渗漏量的估算和提出相应的防渗处理建议。喀斯特防渗处理复杂,要根据不同渗漏类型,结合工程特点和要求,因地制宜地综合考虑铺(粘土或混凝土铺盖)、堵(堵漏水洞)、围(围落水洞、溶斗等)、截(截断渗漏通道)、灌(防渗帷幕灌浆)等工程处理措施。

参考书目

北京大学,南京大学等编著.地貌学.北京:人民教育出版社,1978

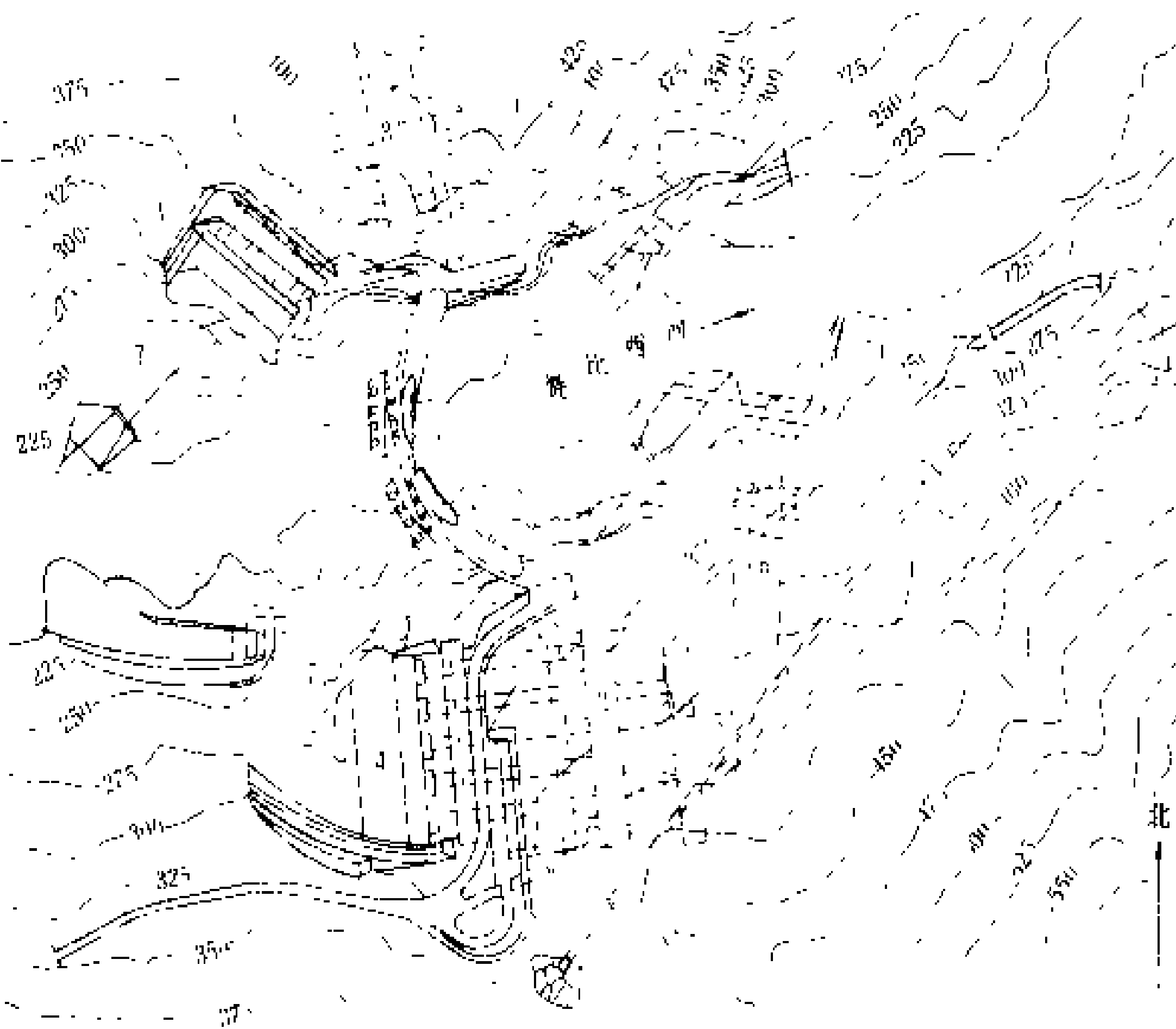
(邹小安)

Kabolabasa Shuidianzhan

卡博拉巴萨水电站 (Cabora Bassa hydro-power Station)

位于非洲东南部莫桑比克境内赞比西河中游,离海口500余km。设计装机容量4150 MW,年发电量205亿kW·h。工程分期建设。初期装机2075 MW,除用220 kV送电给附近地区外,大部分电力用2回±533 kV直流输电线送电至南非的约翰内斯堡,距离1414 km,初期按±266 kV运行。主坝为混凝土双曲拱坝,最大坝高171 m。电站将为开采莫桑比克和邻国的矿产资源和这一地区的钢铁和氮肥工业提供电力,并兼有灌溉和航运效益。工程由葡萄牙帮助设计和建设。工程于1968年11月开始施工准备,1969年10月正式开工,1975年4月开始发电,1979年初期工程竣工,总工期10年。

水文和水库特性 坝址以上流域面积90万km²,多年平均流量2750 m³/s,多年平均年径流量868亿



卡博拉巴萨水电站平面布置图

1—双曲拱坝和泄洪深孔; 2—初期地下厂房; 3—第二期地下厂房; 4—进水口;
5—调压室; 6—尾水洞; 7—导流洞

m³。水库正常蓄水位326 m,回水长250 km,至莫桑比克与赞比亚的国境,水库面积2580 km²,相应库容630亿m³。死水位295 m,调节库容517.5亿m³,库容系数 β_1 为0.60。连同上游干流的卡里巴(Kariba)水库和支流卡富埃河伊太齐太齐(Itezihitezhi)水库,共计调节库容1008亿m³,库容系数 β_2 达1.16,可进行多年调节。水电站最大水头127 m,设计水头103.5 m。

枢纽布置 见图。坝址基岩为良好的粗晶花岗岩片麻岩。双曲拱坝坝顶长321 m,顶厚4 m,底厚23 m,坝体混凝土51万m³。在坝顶以下100 m处设8个深

kai 开

孔,底板高程由 231 m 向上倾斜至 243 m,末端设挑流坎,出口用弧形闸门控制,每孔宽 6 m,高 7.8 m。另在坝顶设一个溢流表孔。总的泄洪能力为 $16000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

初期地下式厂房建在右岸,由 5 个进水口分别经压力钢管引水至厂房。主厂房长 220 m,宽 26 m,高 57 m,安装 5 台单机容量为 415 MW 的水轮发电机组。变压器室位于厂房上游的地下,高压出线经直径为 7 m 的电缆井通至地面。厂房下游有 2 座尾水调压室,宽 21 m,高 71.7 m,长分别为 72 m 和 76 m,下接 2 条尾水洞,分别长 240 m 和 320 m,断面积均为 300 m^2 ,过流能力 $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

第二期工程的地下厂房布置在左岸,计划安装 5 台单机容量相同的机组。

水轮发电机组 混流式水轮机转轮直径 6.56 m,用不锈钢制成。额定水头 103.5 m,额定出力 415 MW;最大水头 127 m,最大出力 484 MW。发电机额定容量 $480 \text{ MV} \cdot \text{A}$,转速为 107.1 r/min,飞逸转速为 212 r/min,功率因数 0.85,电压 16 kV,频率 50 Hz。

工程量和投资 初期工程的主要工程量有:土石方明挖 330 万 m^3 ,石方地下开挖 120 万 m^3 ,混凝土浇筑 120 万 m^3 。总投资 6.25 亿美元,单位投资 301 美元/kW。

(陆钦侃)

kaichangshi jinshuikou

开敞式进水口 (open intake) 无压引水道的进水口。它用于运行水位变化不大的引水式水电站。在多泥沙、多污物和寒冷地区的河流上,开敞式进水口易受泥沙、污物和冰的影响,防沙、防污和防冰措施是影响这种进水口布置的重要因素。

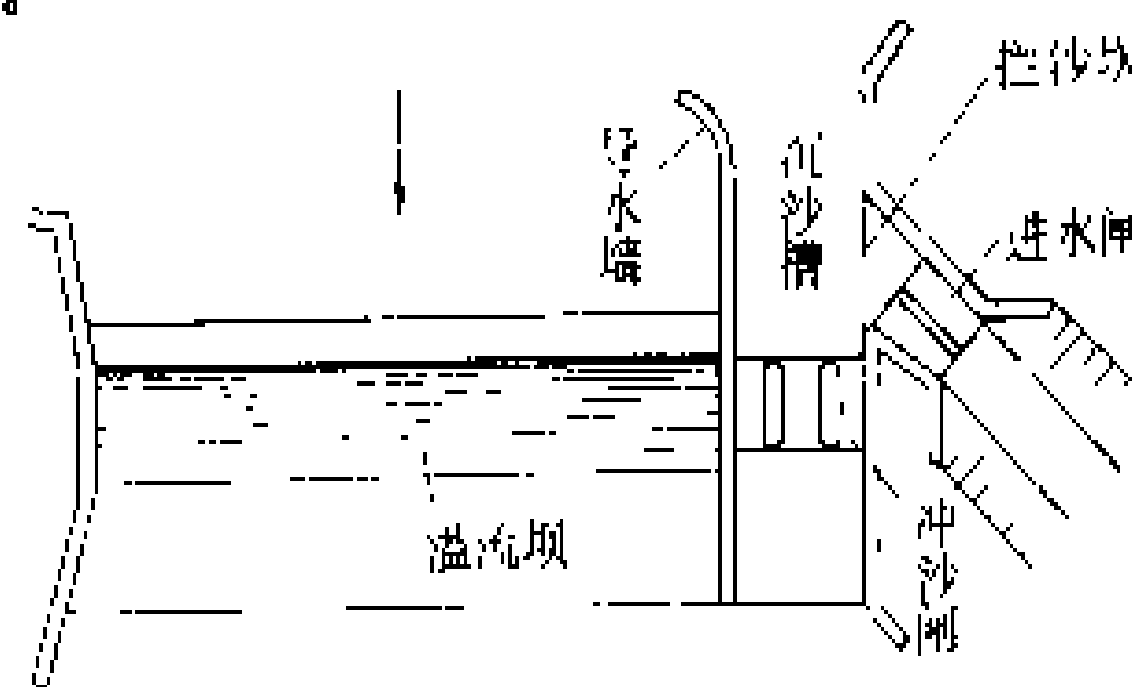
进水口应选在主流稳定的河段上。在弯曲的河道处,又以在凹岸偏下游处最为理想。因为河水流经弯道时产生的横向环流,使表层清水流向凹岸,含沙的底层水流向凸岸,因而能减少泥沙进入和淤堵进水口。在顺直河道上,则选在靠近主流的一岸。有时增设建筑物以形成有利的横向环流。但横向环流强度过大,也会产生不良影响,如淘刷凹岸,淤高凸岸,漂浮的污物和流冰涌向进水口而不易排放,使进水口近旁的泄洪闸泄流不均等。

进水口水流与河道水流的夹角称为引水角,一般为锐角。引水角大,可减少泥沙进入进水口。但引水角偏大,又会影响进流平顺,减少引水量。

开敞式进水口下游多设有壅高水位的建筑物以保证引水,但也有采用无坝取水的,虽比较简单、经济,但引水量小且无保证,现已较少采用。低坝引水所采用的壅水建筑物有拦河的泄洪闸与溢流坝两种方式。泄

洪闸运用灵活,洪水期全部开启闸孔,可基本恢复原河道的水流特性,能排放大量的淤沙和漂浮物。

防沙设施 在拦河的泄洪闸(或溢流坝)与岸边的进水口之间设冲沙闸(见图)冲排淤沙。在泄洪闸(或溢流坝)与冲沙闸连接处设置向上游延伸的导水墙,它具有束水冲砂的作用,又称束水墙。在进水口底板前设拦沙坎,以拦截大量沿河底移动的粗粒推移质,也起导沙坎的作用。在冲沙闸关闭期间,导水墙与拦沙坎之间形成沉沙槽,沉积泥沙;而在冲沙闸开启期间就成为冲沙道,沉积在进水口前的泥沙就被泄水冲排至下游河道。遇较大洪水时,可同时开启泄洪闸,排放闸前库区的淤沙。



开敞式进水口示意图

在水流进入进水口前,虽经拦沙坎、沉沙槽和冲沙闸的拦截、沉积和冲排了大量的底沙,但仍有悬移质和少量推移质进入引水道。因此,有时尚须在进水口后适当位置,布置断面远大于引水道并具有一定长度的沉沙池,使进入引水道的泥沙在沉沙池中沉淀在池底,再经冲沙廊道冲排出去。

防污设施 在进水口前沿设置拦污栅,阻止污物进入引水道。过栅流速要较低,以防污物压在栅页上不易清除并避免水头损失过大。在多污物的河流上,宜设两道拦污栅槽。第一道拦污栅堵塞时,可将备用拦污栅装入第二道栅槽,然后提起第一道拦污栅清污;也可以在第二道栅槽内放下检修闸门,使门前成为静水区,易于清理第一道拦污栅上的污物。

无压引水道末端压力管道进口处也应设拦污栅,阻止中途进入水道的污物进入压力管道。

多污物的河流上,可在进水口拦污栅前方水域中增设一道拦污-导污排,使其具有一定的吃水深度,能拦截漂浮的潜没的污物,并导至泄洪闸或专设的排污道排至下游。为了节省水量可在泄洪闸闸门上缘作一适当高度的舌瓣门,能向下游翻倒排污。经过这一道的拦截和排放,可减轻拦污栅清污和污物处理的工作。

水库蓄水前应清理库区,防止蓄水后大量污物集中涌向进水口。

防冰设施 在严寒地区的河流上,多在进水闸的闸室设排冰道排冰。

进水闸前的冰盖除减少发电引用的流量外,对建

筑物、拦污栅和闸门会作用很大的静冰压力。为了消除这一压力，一种方法是沿结构物挡水面用人工或机械方法破冰，使冰盖与结构物脱离接触；另一种方法是调节水与结构接触带的温度，如在其上建暖房；或电热拦污栅和金属闸门；或将压缩空气通过插入水下一定深度的铁管吹出气泡；或直接用潜水泵将深部水抽上来，使水面水温高于冰点而不结冰。

(丁志华)

kaiguanzhan

开关站 (switchyard; switching substation)

水电站枢纽中，布置有输电、配电线路终端和主变压器高压出线的开关设备，进行电能集中、分配和交换的场所。也有称高压配电装置的。开关站中的电气设备包括断路器、隔离开关、电压互感器、电流互感器、避雷器、阻波器、母线、结合电容器、并联电抗器以及相应的系统安全和控制设施等。这些设备的连接和布置，全部依照电气主接线的要求。

开关站的基本单元叫间隔，一般有进线间隔、出线间隔、母联间隔、避雷器电压互感器合并间隔（或分为避雷器间隔和电压互感器间隔）等。进线间隔包括进线断路器、电流互感器、隔离开关及相应的母线段。出线间隔包括出线断路器、电流互感器、隔离开关及相应的母线段。母联间隔包括母联断路器、电流互感器、隔离开关及相应的母线段。避雷器电压互感器合并间隔包括避雷器、电压互感器、隔离开关及相应的母线段。

开关站里，道路的布置很重要，要保证能接近每一设备以便检查维护，并要有足够的检修和起吊、搬运设备的空间。

开关站分类 水电站的开关站分屋外开关站和屋内开关站两种。屋外开关站的电气设备露天布置，迄今为止，水电站用得最多。屋外开关站按结构型式可分为高式、中式和低式三种；按母线型式分为软母线和硬母线两种。在山势陡峻的地区，沿不同高程分几层布置的，称阶梯式。屋内开关站，电气设备布置在屋内，环

境条件好，适用于空气污秽或近海环境对金属有腐蚀的地方，一般电压较低，多在 110 kV 及以下。

气体绝缘金属封闭电器是 20 世纪 60 年代发展起来的成套高压电气装置，体积小，占地面积少，使用空间小，使开关站的布置形式有了新的进展。这种成套电气装置既可布置在屋内，也可布置在屋外，适合深山峡谷大型水电站，特别是厂房布置在地下水电站的建设需要。

屋外开关站的布置形式 高式、中式、低式是三种典型布置形式。也有介于高式和中式之间的布置形式，称半高式。

(1) 高式布置。两组母线上、下重叠，母线隔离开关相应位于各层母线下。其最大的优点是占地面积小，一般约为中式布置的一半，很适合处于山谷且平地较少的水电站。并且，由于布置紧凑，减少了绝缘子串、电缆和导线的数量。它的主要缺点是操作维护困难，其次是钢材用量大。图 1 示出布置在水电站厂房和大坝

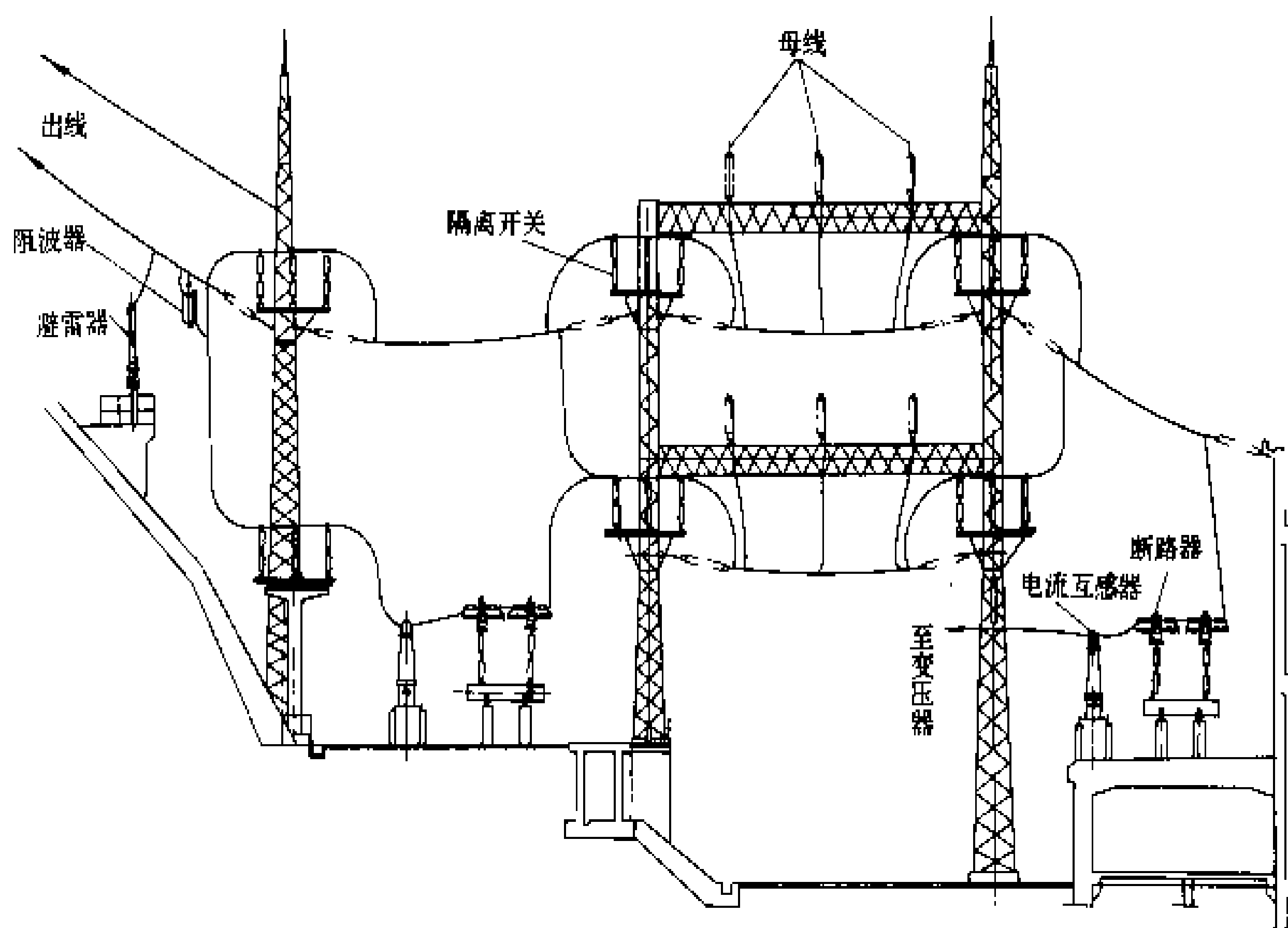


图 1 水电站 220 kV 屋外开关站高式布置

间的 220 kV 屋外开关站高式布置方式。

(2) 中式布置。所有设备都放在支架上，使带电部分与地面保持必要的高度，操作维护方便，也很安全。缺点是占地面积较大。若采用单柱式隔离开关、硬母线布置，可以减少面积，减少开挖量。若沿山作阶梯式布置，虽不减少占地面积，但可减少开挖量。图 2 为水电站 220 kV 屋外开关站中式布置方式。

(3) 低式布置。电气设备放在地面基础上，设备周围设围栏，以保证人对电器的安全距离。其优点是：很少高空作业，安装维护方便；节省支架，缩短工期，降低造价；设备重心低，抗震效果好。缺点是占地面积大和

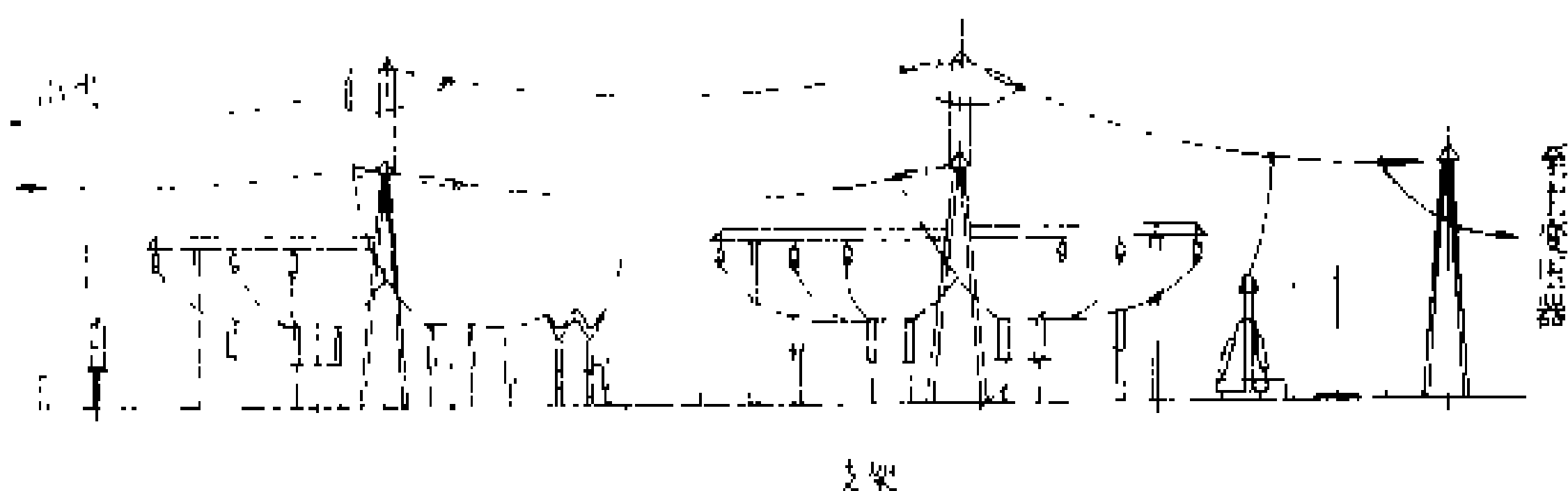


图2 水电站 220 kV 屋外开关站中式布置

尘土污染严重。采用手车式断路器,可以减小占地面积。

(黄贤鉴)

kance sheji jishu biaoazhun

勘测设计技术标准 (technical standard for investigation and design)

对于水电站勘测设计工作中各设计阶段的工作程序、内容和深度,建筑物和设备的安全、设计原则等以条文形式作出的统一规定。制定勘测设计技术标准的目的是为了指导水利水电勘测设计工作的正常进行,以获得最佳秩序和社会经济效益。制定技术标准时要以水利水电工程勘测、规划、设计、施工、安装和运行等方面的实践经验和科学技术成果为基础,并经有关方面协调同意,以期达到技术上先进、经济上合理。技术标准需经公认的机构批准,以特定的形式发布。

主要国家的技术标准

迄今为止,尚无国际通用的水利水电勘测设计技术标准,世界各国在这方面的做法也各有不同。迄今美国尚无全国通用的技术标准,而只有各部门和地方(州)制订的技术标准,其中著名的有美国垦务局(United States Bureau of Reclamation, USBR)的一系列标准和规范,如“混凝土重力坝设计准则”(1976年)和“混凝土拱坝设计准则”(1976年)等,在国际上广泛流传,影响很大。美国陆军工程师团则以“手册”形式出现,以部队命令批准执行,实际上已属于技术标准范畴。苏联则有国家标准和部标准等,如“建筑法规”中的有关篇章就是经苏联国家基本建设委员会批准的全苏技术标准;苏联动力和电气化部及莫斯科水工建筑物设计总院等也相应地颁发有关技术标准。日本的全国性技术标准由政府有关机构(省)和权威性学术团体颁发,如日本大坝委员会曾于1978年颁发了经过修订的“大坝设计标准”。法国则没有制订过水利水电工程勘测设计技术标准。

中国的技术标准

1949年以前,中国的水利水电建设十分落后,没有制订过水利水电勘测设计技术标准。1949年10月

中华人民共和国成立以后,随着水利水电建设事业的发展,有关技术标准也逐步增多起来。20世纪50年代,在水利水电勘测设计工作中,主要是套用或借鉴苏联等国的技术标准;与此同时,当时的燃料工业部(后来为电力工业部)和水利部先后颁发了《测量规

范试行草案》、《水文资料整编办法》、《钻探技术保安试行规程》和《大中型水力发电站初步设计和技术设计编制规程》等专业技术标准。自1960年至1966年,水利电力部水利水电建设总局先后举办了一批勘测设计规范的研究班,提出了一批研究班定稿的规范,除《水工隧洞设计规范》经水利电力部正式批准试行外,其余十多本规范(研究班定稿)虽未经审批颁发,但在勘测设计工作中已被广泛使用,实际上已部分地起到了技术标准的作用。1972年水利电力部根据原国家建委的要求,由水利电力部科学研究所设计管理室代部组织技术标准的制订和审查工作。1978~1979年,SDJ12-78《水利水电工程等级划分及设计标准(山区、丘陵区)》、SDJ14-78《水利水电工程地质勘察规范》、SDJ21-78《混凝土重力坝设计规范》和SDJ10-78《水工建筑物抗震设计规范》等十余本重要的勘测设计规范经水电部审批后,第一次在全国颁发试行。1984年,GBJ71-84《小型水力发电站设计规范》经国家建委审批颁发,这是中国第一本水利水电勘测设计方面的国家标准。1979年以后,标准化工作发展很快。据1990年底统计,已颁发的部标准中,计有规程规范50多本,定额10多本,已初步形成了水利水电勘测设计技术标准的骨架。

技术标准体系

为了加强水利水电勘测设计行业管理,健全和完善技术立法工作,水利水电规划设计总院于1988年制定了《水利水电勘测设计技术标准体系》(以下简称《技术标准体系》),并于同年9月经能源部和水利部批复同意。在《技术标准体系》中,共列出了127本技术标准。这些标准主要适用于大中型水利水电工程,对于小型水利水电工程,在《技术标准体系》中只列出了主要的技术标准。在上述标准中,按专业划分,计有:行业通用标准14本;规划17本;勘测15本;水工24本;机电31本;施工14本;定额12本。《技术标准体系》较全面地覆盖了水利水电勘测设计的各主要专业,今后将根据技术的发展、工程建设实践经验的积累和勘测设计工作的需要,及时进行修订。水利水电规划设计总院拟于1995年基本完成上述技术标准的制订和修



订工作。

技术标准的分类

国际上对技术标准尚无统一的分类办法。这里只介绍中国现行的分类办法。

技术标准根据其适用范围一般可分为国家标准、行业标准(部标准)、地方(省、自治区、直辖市)标准和企业标准。国家标准是指需要在全国范围内统一的技术要求,由国家授权的标准化行政主管部门(现为建设部)组织制定、审批和发布。行业标准是对没有国家标准而又需要在全国某个行业范围内统一的技术要求制定的标准,由国务院有关行政主管部门(电力工业部和水利部)组织制定、审批和发布,并报国务院标准化行政主管部门(建设部)备案。地方标准和企业标准则分别由地方和企业制定,并分别在该地区和企业内适用。迄今在水利水电勘测设计技术标准方面,还没有地方标准和企业标准。

国家标准和行业标准按其执行的严格程度可分为强制性标准和推荐性标准。地方标准在本地区内是强制性标准。国家鼓励企业自愿采用推荐性标准。

编写标准的基本要求

(1) 协调性要求。表现在两个方面:编写标准首先要符合国家的方针、政策、法令和法规;其次在标准体系内部要协调,即下级标准要服从上级标准,不得与上级标准相抵触,同级标准之间也要协调一致。

(2) 准确性、简明性要求。准确性要求指的是标准编写时要逻辑性强、语气肯定,防止产生歧义,措词要准确、统一。简明性指的是标准中所用的语言要简单、明了、通俗易懂;编写时要突出主题。

(3) 正确性要求。标准中所作的规定只能是经过严格的科学验证、精确的数学计算、并以现代科学技术的综合成果和先进经验为基础而取得的。标准中的规定必须正确可靠,只有这样,才能保证标准在技术上是先进的,经济上是合理的。

(4) 统一性要求。同一标准中所用的术语、符号、代号前后要统一;各标准之间也要统一。

(5) 规范性要求。指的是标准的编排格式和细则,包括标准的构成、内容编排、层次划分及其编号等均要做到规范化。

(郑顺炜)

ke' neng zuida baoyu

可能最大暴雨 (probable maximum precipitation, PMP) 现代气候条件下,特定地区,一定历时内可能发生的最大暴雨量。可能最大暴雨是根

据已有的暴雨和气象资料,运用水文气象学理论和方法估算的最大暴雨值。估算可能最大暴雨是估算可能最大洪水的重要组成部分。作为计算设计洪水的另一种途径,称为水文气象法。其基本点是:广泛收集流域内外的暴雨气象资料,深入研究各次暴雨的特性,尤其对暴雨的特大值作详尽的天气系统分析、暴雨移置判断等工作,并采用外推放大、外包等方法适当处理,以达到可能最大暴雨的水平。计算的主要步骤包括典型暴雨选择、典型暴雨放大和外包处理。

典型暴雨选择 在分析研究各场暴雨资料的基础上,结合工程的设计要求,选定典型暴雨。根据暴雨资料来源的不同,典型暴雨可分为当地暴雨、移置暴雨和组合暴雨3类。

(1) 当地暴雨。为本流域实测或调查到的实际发生的大暴雨或特大暴雨。

(2) 移置暴雨。为外流域移置来的大暴雨或特大暴雨。移置的条件为:①天气气候上能发生相似特性的暴雨;②地形上基本相似,如两地的高程或地理位置不同,可作适当修正。

(3) 组合暴雨。适用于推求大面积、长历时的可能最大暴雨,即将两场或两场以上的暴雨按天气气候学的原理,合理的组合在一起,构成一场新的暴雨作为典型暴雨。

典型暴雨放大 根据各场典型暴雨成因分析得出的气象因子进行放大。放大的方法有水汽因子放大、动力因子放大以及水汽和动力因子联合放大3种。

(1) 水汽因子放大。常采用可降水作为放大指标。

(2) 动力因子放大。常采用风速、辐合上升速度等作为放大指标。

(3) 水汽和动力因子联合放大。常用的有可降水和风速联合因子放大、水汽输送率放大等。

对组合暴雨的放大,一般只按其中主要一场暴雨的气象因子进行放大。

确定放大指标常用两种方法:一是选择历史上出现过的最大值;二是对放大采用的气象因子作频率计算,选择某一较小频率如五十年一遇或百年一遇的数值作为放大最大值。

外包 上述初步估算的成果,由于资料条件限制,由一场暴雨放大或放大移置来的暴雨,有时不能保证其成果达到可能最大暴雨的水平。在某些工程的可能最大暴雨计算中,用外包的方法以求达到可能最大暴雨水平的数值,即将多场放大的暴雨及放大移置来的暴雨,绘制成暴雨的时、面、深外包线,在该外包线上读得的可能最大暴雨值,可体现可能最大暴雨水平的数值。这种外包线既能插补未发生或未测到的数值,也能协调各时段及各种流域面积上的数值。

ka 可

简史 推求可能最大暴雨的水文气象法始于美国 20 世纪 30 年代中期，目前仍为不少国家在工程设计中应用。中国从 50 年代起开展这项工作，70 年代水利电力部编制了中国可能最大 24 h 点雨量等值线图。1979 年水利部和电力工业部颁发的《水利水电工程设计洪水计算规范》正式把水文气象途径估算可能最大暴雨列入了规范。

现代气象科学关于暴雨物理机制还不足以精确计算暴雨的可能最大值，因而对可能最大暴雨的估算值需进行多方面的合理分析，以及与已有观测到的特大暴雨记录进行比较，在空间上可推广到气象上和地形上可以比拟的地区，在时间上可包括历史上曾经发生过的特大暴雨，这些对可能最大暴雨的估算都是很有参考价值的。

参考书目

詹道江，邹进上，可能最大暴雨与洪水，北京：水利电力出版社，1983

(顾传智)

ke' neng zuida hongshui

可能最大洪水 (probable maximum flood, PMF) 在特定流域上可能产生的最大洪水。可能最大洪水是考虑以最恶劣的气象和水文条件组合形成的洪水。在工程设计中，认为以此估算的设计洪水被超过的可能性是极小的。可能最大洪水计算首先要根据水文气象学的理论和方法，估算出可能最大暴雨，再考虑以较小的土壤入渗损失，进行产流、汇流计算，求得设计断面的可能最大洪水过程线。

由暴雨转换到洪水的过程，有两类计算方法：一类是传统的经验方法，即用暴雨径流相关与扣损的方法进行产流计算，用单位线、河网汇流曲线与推理公式等方法进行汇流计算；另一类是用降雨流域模型进行计算，输入降雨或其他气象因子，直接输出洪水过程。在可能最大暴雨条件下，对某些产汇流参数可作特殊考虑，例如在产流计算方面，流域前期影响雨量 P_n ，在湿润地区，可考虑等于流域最大损失量 I_m ，但干旱地区，这办法不宜采用。在净雨的推求上，对湿润地区可以认为全部降雨都产生径流，暴雨径流关系的高水位部分可按 45°线外延或只按扣除稳渗的办法计算净雨；对于干旱地区，多用下渗曲线或初损后损法求净雨，并注意雨强、雨量对产流的影响，采用由特大雨洪推出的数值。在汇流计算方面，由于汇流的非线性影响，应尽量选用由实测大洪水资料分析得出的单位线或推理公式中的参数值，如果缺乏大洪水资料，应考虑计算参数的非线性外延修正。

美国自 20 世纪 30 年代，开始采用可能最大洪水

作为重大水库工程的设计洪水标准。其它国家，如英国、加拿大、印度、菲律宾等国，也多采用可能最大洪水作为水库设计洪水的最高标准。中国从 50 年代后期开始，在个别工程设计中作过可能最大暴雨和可能最大洪水的估算。1978 年水利电力部颁发的 SDJ12-78《水利水电枢纽工程等级划分及设计标准》，及 1990 年能源部和水利部对该标准的补充规定，都规定以可能最大洪水作为失事后对下游将造成特别重大灾害的一级永久性土石坝及其泄水建筑物非常运用(校核)洪水的标准。

由于目前科学技术水平和水文气象资料条件的限制，可能最大暴雨及可能最大洪水还只能是近似的推求。因此，对其计算成果，要经过多种方法进行综合分析，合理选定。

参考书目

詹道江，邹进上，可能最大暴雨与洪水，北京：水利电力出版社，1983

(顾传智)

Kelasinuoya' ersike Shuidianzhan

克拉斯诺雅尔斯克水电站 (Krasnoyarsk Hydropower Station) 位于苏联西伯利亚叶尼塞河干流上，总装机容量 6000 MW，多年平均年发电量 204 亿 kW·h，以 220kV 和 500kV 电压输电线路向西伯利亚联合电力系统送电。除发电外，还有航运及防洪效益。主坝为混凝土重力坝，最大坝高 124 m。1956 年开始施工准备，1961 年开始浇筑混凝土，1962 年截流，1967 年 11 月头 2 台机组发电，1971 年第四季度 12 台机组全部投入运行。总工期 11 年。升船机于 1976 年完成安装，试运行 10 年后，由航运部门验收。(参见彩图插页第 16 页 26 图)

水文和水库特性 坝址以上流域面积 28.9 万 km²，多年平均年径流量 884 亿 m³。正常蓄水位 243 m，相应库容 733 亿 m³，水库回水长 340 km，水库面积 2000 km²。死水位 225 m，调节库容 304 亿 m³，库容系数 0.34，连同上游萨扬-舒申斯克水库合计库容系数 0.52，可进行多年调节。水电站设计水头 93 m，最大水头 100.5 m。坝址处实测最大洪峰流量 29800 m³/s。

枢纽布置 坝址基岩为坚硬花岗岩。电站枢纽由混凝土重力坝、坝后式厂房和左岸斜面升船机等建筑物组成，见图。

重力坝顶长 1065m，上游面垂直，下游面坡度 1：0.7～1：0.8。

枢纽自左向右包括：左岸非溢流坝，长 187.5m；溢流坝，长 225 m；河床非溢流坝，长 60 m；厂房坝段，

长 360 m；右岸非溢流坝，长 232.5 m。坝体由伸缩缝分成 71 个坝段，每个坝段宽 15 m。沿坝基设减压排水廊道，宽 4~6 m。坝基帷幕灌浆深度为 60 m。溢流坝

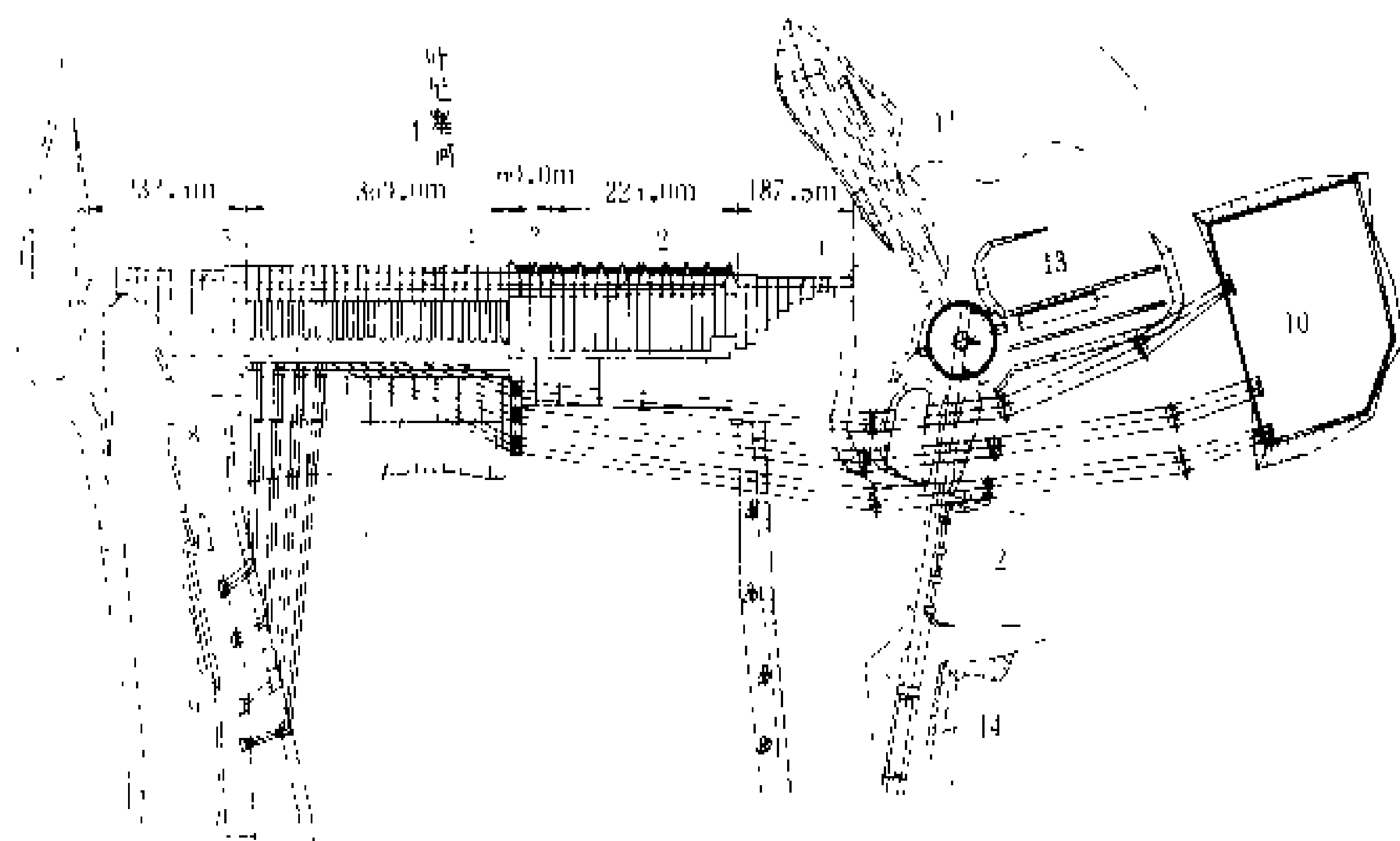
kV，采用晶闸管励磁。220 kV 开关站布置在右岸厂房下游，500 kV 开关站设在左岸船闸转向装置右侧。

工程量和工程施工 电站工程量包括：土方开挖

534 万 m^3 ，石方开挖 764 万 m^3 ，土石方回填 724.8 万 m^3 ，混凝土和钢筋混凝土 552.2 万 m^3 ，金属结构和机械设备安装 7.0 万 t。

施工时工地装有连续式和分批式混凝土拌和楼各一座，设计生产能力分别为 240 m^3/h 和 96 m^3/h ，施工高峰年实际曾达到 280 m^3/h 和 108 m^3/h 。1967 年 11 月初水库蓄水 250 亿 m^3 ，水头达 60 m 时，首批 2 台机组即投运发电，以后每年投入 2 台，于 1971 年达到设计容量。

（高义生）



克拉斯诺雅尔斯克水电站枢纽平面布置图

- 1—左岸非溢流坝；2—溢流坝；3—河床非溢流坝；4—厂房坝段；5—右侧河床非溢流坝；6—右岸非溢流坝；7—厂房；8—安装场；9—220 kV 开关站；10—500 kV 开关站；11—上游行船道；12—下游行船道；13—转向装置；14—承船厢

设 7 个溢流孔口，孔宽 25 m，高 12.5 m，用滑动式平面闸门控制，在正常蓄水位时可下泄流量 12000 m^3/s ，泄槽末端设挑流鼻坎，将水流挑离至坝趾以下 140 m 的河床内。加上 8 台机组泄量 4800 m^3/s ，能保证下泄千年一遇洪水。

厂房坝段上游侧设 24 个发电进水口，下游侧为坝后式厂房。每个进水口后接 1 条高压引水钢管，管径 7 m，外包钢筋混凝土，采用背管方式布置。每 2 条引水钢管在机组上游侧合并成 1 条，向 1 台水轮机供水。坝后式厂房高 18 m，宽 30 m，长 430 m，其中包括安装场 60 m。1964 年发现厂房坝段坝基岩石内有缓倾角裂隙分布后，及时改变了厂房坝段和厂房水下部分的结构设计，增加坝下游棱体深度，使坝的水平载荷由坝体、压力钢管镇墩和厂房共同承担。

坝顶设有起重量为 250/30 t 的门式起重机 3 台，用以启闭溢流坝泄洪孔和厂房进水口的闸门。

斜坡升船机设于左岸，由下游引船道、上游引船道、承船厢、斜坡道和坝顶转向装置组成，其升船能力为 2000 t。

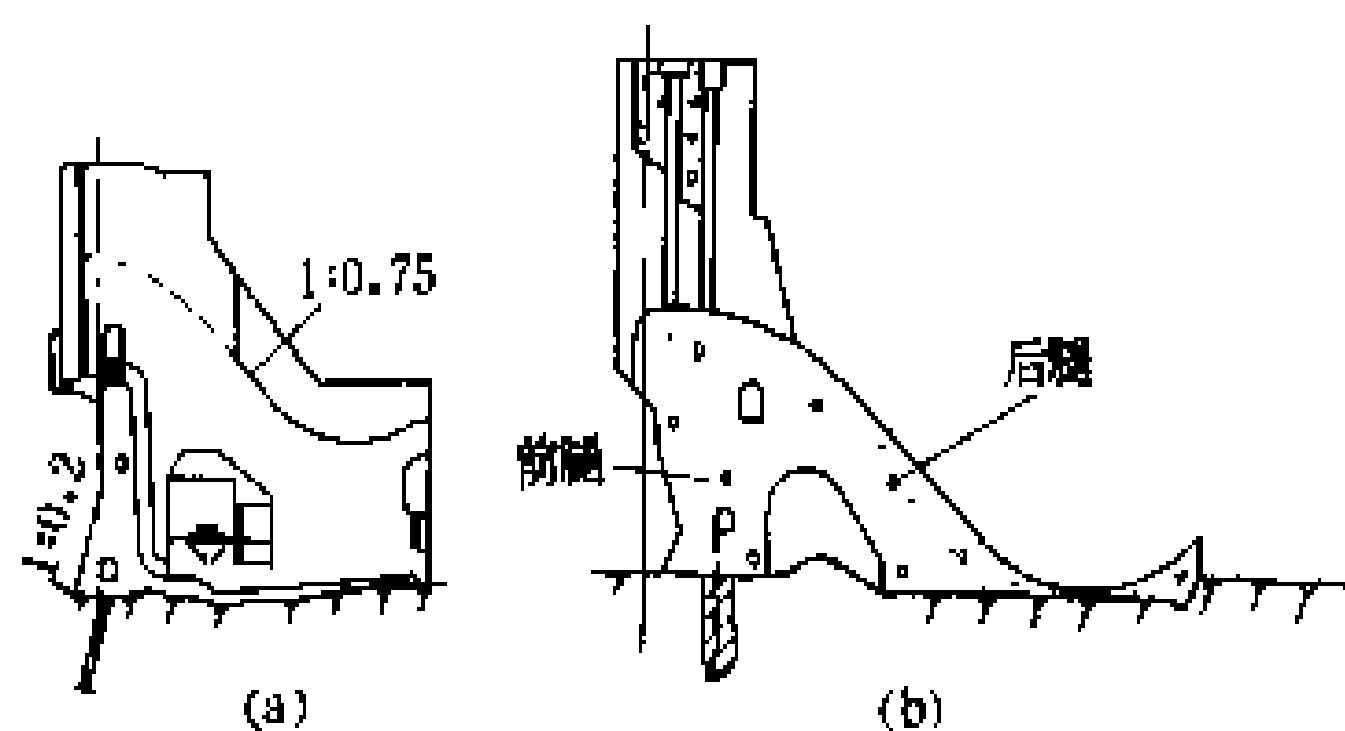
机电设备 厂房内安装 12 台 500 MW 混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径 7.5 m，重 240 t，额定转速 93.8 r/min，额定水头 93 m 下的额定出力 508 MW，引用流量 615 m^3/s 。伞式发电机最大视在功率 588 $\text{MV} \cdot \text{A}$ ，转子直径 16.1 m，重 889 t，采用强制风冷，定子采用水内冷。发电机功率因数 0.85，电压 15.75

kongluba

空腹坝 (hollow dam) 在坝体内沿坝轴线方向设置大尺寸纵向空腔(空腹)的坝。它用混凝土或砌石建造。空腹坝的主要优点有：①在河床狭窄的坝址布置地面厂房困难时，可在空腹布设厂房，往往比地下厂房的工程量和投资省。②空腹可降低坝基扬压力。③施工前期在围堰内的开挖量和混凝土浇筑量较少。对于在空腹内不设厂房的空腹坝，有可能在一个枯水期内将大坝的前腿抢出水面，从而得以降低上游围堰的洪水设计标准，加快施工进度。④散热面增多，便于混凝土降温。空腹坝的主要缺点是：结构较为复杂，设计、施工都有一定难度；钢材用量较多。按坝型分空腹坝主要有在重力坝内设置纵向空腔的空腹重力坝和在重力拱坝内设置纵向空腔的空腹拱坝两种类型。空腹内可设或不设发电厂房。空腹重力坝的剖面见图所示。中国凤滩水电站采用了空腹拱坝。

空腹轮廓 空腹的形状和尺寸如下：①对于空腹内不设厂房的坝，空腹形状近似半个椭圆形，椭圆的长轴与水平面约成 60°角，空腹的高度一般小于坝高的 1/3，超过时需对前、后腿加固，最高也不宜超过坝高的一半。在坝剖面的水平方向，前腿、空腹和后腿的宽度约各占总的坝底宽度的 1/3，前腿的比例略大些较为有利。②对于空腹内设置厂房的坝，空腹还应满足厂

房的布置要求。由于尾水管对后腿有削弱作用,最好采用窄而高的或方圆形的尾水管。



空腹重力坝剖面示意图
(a) 有坝内厂房; (b) 无坝内厂房

结构设计 50年代设计空腹坝时,多按结构力学方法进行坝体应力分析并进行平面光弹试验。20世纪70年代以来多采用有限元分析、三向光弹试验或脆性材料结构模型试验等手段,综合分析空腹坝的应力,使设计更趋完善。

空腹坝实例 空腹坝在中国有较大的发展,至1985年已建成空腹坝17座,其中混凝土空腹重力坝7座,最高的是广东省的枫树坝水电站大坝,坝高93.3m,空腹内设有75MW的机组2台和变电站等,且坝顶溢流;凤滩水电站空腹拱坝,坝高112.5m,是世界上最高的空腹拱坝,坝顶溢流,坝内设有100MW的机组4台和变电站等;建成砌石空腹重力坝6座,最高的是湖南省的岩屋潭坝,高66m;此外尚建成砌石空腹拱坝3座。20世纪60年代在葡萄牙修建了宾波斯塔(Bemposta)空腹拱坝(坝高87m)和卡腊帕提洛(Callapatelodaha)空腹重力坝(坝高57m),两坝均从坝顶溢流,空腹内未设厂房。

(郑顺炜)

kong hua

空化 (cavitation) 水体在恒温下减压,出现空泡的现象,亦称空泡、空穴。由溶解于水中的气体扩散、膨胀而形成的空泡,称为“含气型空化”,其形成和发展比较缓慢;由水体气化而形成的空泡,称为“含汽型空化”,其生成、发育和溃灭都是猝发型的,对水力机械或水工建筑物固体边界常造成空蚀破坏。通常工程中空蚀多由含汽型空化所造成。水体含有杂质(微小固体颗粒及依附其上的“汽核”)才会有空化发生,不含杂质的水体具有很大的抗拉强度,不易出现空化。

空化的形态有4种类型:固定空化、游移空化、振荡空化和旋涡空化。1873年,O.雷诺(O. Reynolds)就曾预言,高速转动的船舶螺旋桨将会产生真空洞。1897年“果敢号”鱼雷艇的推进器效率严重下降事件发生,人们开始提出“空化”的概念。至20世纪30年

代,水工建筑物中的空化现象亦开始引起人们注意。二次世界大战后,随着生产建设的发展,液体流场的空化现象屡见不鲜,对空化的研究有了较大进展。有关空化的研究内容有:空化机理(空泡动力学)、空化噪声、空蚀破坏、防空蚀措施以及超空化研究等。

表征液体流场空化特征的基本参数是空化数(亦称空穴系数、空泡数)

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho V_0^2}$$

式中 p_0 和 V_0 为未受扰动的来流压强和流速; p_v 为环境温度下饱和蒸汽压强; ρ 为液体密度。空化数常被用来表示液体中空化发生条件和空化发展程度,而且还是液体空化的动力相似准则。

表征流场边界空化特征的参数是初生空化数(σ_i)。当流场边界上局部压强降低时,液体中的汽核则发育生长,直至出现微小短暂的瞬态空泡,称为空化初生,此临界状态下的空化数称为初生空化数。初生空化数反映流场边界特征,且与液体性质(密度、粘性、杂质含量等)、流场动力因素(流速、绝对压强等)等有关。具体条件下的初生空化数常由实验确定。当边界附近的流动不发生分离时,初生空化数的理论值可借物体表面的最小压力系数 C_{pmin} 来确定,即

$$\sigma_i = -C_{pmin} = \frac{p_0 - p_{min}}{\frac{1}{2} \rho V_0^2}$$

初生空化数常被用来判断空化是否发生。当液体空化数 σ 大于既定边界的初生空化数 σ_i , 即 $\sigma > \sigma_i$ 时,空化不会发生; $\sigma \approx \sigma_i$ 时,空化初生; $\sigma < \sigma_i$ 时,空化发展。

目前,对空化的认识主要依赖于实验室的模拟空化试验和生产实践中对空蚀现象的观察。室内模拟试验存在着缩尺效应问题,因为模拟试验的模型尺度、绝对流速、物面状况、液体性质(杂质含量、热力学性能……)等因素,与原物总是存在着差异,不可能做到完全的相似。实际工程中的空化现象,目前测试手段尚不完善,不易直接观察到,通常通过其产生的后果——空蚀来分析和推断。

参考书目

- [美]柯乃普 R T,戴利 J W,哈密脱 F G. 空化与空蚀. 水利水电科学研究院译. 北京:水利出版社,1981
Knapp R T, Daily J W, Hammitt F G. Cavitation. New York: McGraw-Hill Book Co, 1970

(时启燧)

konghua shiyan

空化试验 (cavitation model test) 研究

水流由于压力降低而形成空化现象的水力学模型试验。1754年L. 欧拉(L. Euler)在研究水轮机理论时,首次提出低压区水流空化的可能。1894年O. 雷诺(O. Reynolds)第一次在试验室内进行了空化试验。1895年英国根据C. A. 帕森斯(C. A. Parsons)的设想建立了世界上第一座空化试验小水洞。在实际泄水建筑物中,常因体型不当或流速过高而引起局部地区压力降低,水中一定大小的流动气核或附在固体表面的气核将膨胀而形成空穴。当空穴行至高压区溃灭时可能产生很大的压力冲击,或在边壁面附近形成微射流,在极短时间内产生压强极大的冲击力,造成建筑物的破坏,这时就出现空蚀现象。为减轻或避免空蚀破坏,重要工程一般都要进行空化试验。

试验内容 水流空化的程度常用水流空化数 σ 作为衡量指标。

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho v_0^2}$$

式中: p_0 、 v_0 分别为水流中未受干扰的参考压强和流速; p_v 为某一温度时的平衡蒸汽压强。水流空化数愈小,发生空化的可能性愈大。当空化数降到某一数值 σ_c 时,水流中局部地区就会产生空化, σ_c 称为初生空化数。影响空化数的因素很多,如流速、压力、过流表面形状、尺寸大小、水流中气核含量、掺气量、水质、热力特性、表面张力、粘滞性等。空化试验的主要内容就是测取水流初生空化数,并调整影响空化数的主要因素,使其尽量加大,避免产生空化与空蚀。由于当前试验技术和理论水平所限,空化试验中的缩尺影响至今尚未解决。

空化试验方法和设备 主要有两大类。一类是控制流速以改变局部压力,使之发生空化现象,例如循环水洞、文德里(Venturi)管等。这类设备的原理是水流突然收缩形成高流速段,然后再流向扩散段使流速降低。在这种设备中可进行表面不平整体、进水口、闸阀、闸墩、消力墩及叉道等部件的二维空化试验。另一类是在真空箱中进行减压试验。这时除按重力相似准则设计模型外,还要求原型与模型空化数的比值 $\sigma_r = 1$ 。为实现这一要求,要控制减压箱的真空度 η ,使

$$\eta = 1 - \frac{(h_v)_m}{h_s} - \frac{(h_a)_m}{L_r h_a} + \frac{(h_v)_p}{L_r h_a}$$

式中 h_s 为室内大气压力水柱; h_v 为蒸汽压力水柱; L_r 为长度比尺; m 代表模型; p 代表原型。在真空箱内可以进行三维空化试验。

参考书目

[美]柯乃普 R T,戴利 J W,哈密脱 F G,空化与空蚀,水利水电科学研究院译,北京:水利出版社,

1981

(Knapp R T, Daily J W, Hammitt F G. Cavitation. New York: McGraw-Hill Book Co, 1970)

(李桂芬)

kongshi

空蚀 (cavitation erosion) 流场固体边壁受空化溃灭的冲击作用而产生的剥蚀破坏现象,亦称汽蚀。空蚀是空化的后果,使水力机械效率降低,使过水建筑物遭受破坏。水利水电工程中空蚀形成的过程是:高速水流流过边壁不顺直或不平整处,局部压强降低而出现了空泡,空泡随水流移至下游高压区后,其周围的压强一般是不平衡的,压力高的一侧开始变形,形成微型液体射流,穿透空泡,在空泡行将溃灭的瞬间,微射流达到极高的速度,并以极大的冲击力作用于边壁表面,多个空泡连续溃灭的冲击作用,致使边壁材料产生疲劳而剥落破坏。与此同时,空化溃灭还产生自由氧,加剧了对边壁材料的化学腐蚀作用。

空蚀的主要特征是破坏面呈麻点状痕。轻度空蚀,常以单位时间内,在单位面积上出现的麻点数作为空蚀率(空蚀强度)指标;严重空蚀多呈大面积空蚀坑,破坏面上仍可见麻点状蚀痕,通常用单位时间内物面材料损失的重量(或体积)作为空蚀率指标。另外按空化溃灭的微射流模式,空蚀强度系数可写为:

$$\eta = \frac{I_*}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} = \frac{\sigma}{\delta} (\Delta \sigma)^2 \exp \left[\frac{2.67}{W(\Delta \sigma)} \right]$$

式中 I_* 为空化溃灭强度; ρ 为液体密度; V_0 为液体流速; $\Delta \sigma = \sigma_c - \sigma$ 为既定边壁体型的初生空化数 σ_c 与当地水流空化数 σ 之差值; δ 为相对汽核尺度; W 为韦伯(Weber)数。空蚀率与暴露时间的关系是非线性的,从空化发生到空蚀开始有一个潜伏期,在此期间没有蚀痕;空蚀一旦开始出现,空蚀率陡增,很快达到最大值;此后,空蚀率增长缓慢,几乎趋于某一稳定值。R. T. 柯乃普(R. T. Knapp)指出,空蚀率约与当地液体流速的6次方成正比。水工建筑物中的空蚀常伴生磨蚀与动水压力等作用,致使破坏范围扩大,如图。



刘家峡泄洪洞空蚀破坏实例

影响空蚀的因素有：流动因素（流速、压强等）、液体性质（杂质含量、含气量、密度、温度等）、边壁材料（物质结构、弹性模量等）、空化历时等。

空蚀研究的主要目的旨在寻求防蚀减蚀的技术措施，如：

（1）改善流场固体边界形状，以改善局部压强状态。如改善水翼、水轮机叶片的形状，优化水下运动物体或水工建筑物的体型设计，控制过流表面的施工不平整度等。

（2）寻求耐蚀或抗蚀的物面材料。早期认为金属材料硬度高，弹性模量大，曾广泛用于防蚀；近年来，发现非金属的塑性材料（如环氧树脂、硅粉……）具有能储存冲击能量的优点，可提高物面的抗蚀性能。于是水工建筑物中有时采用了环氧抗蚀涂层、硅粉混凝土等。

（3）利用水流掺气来减蚀（见掺气水流）。如：在过水建筑物流速高、压强低的部位设置掺气槽（坎）向可能发生空化的过流部位通气，以及水轮机下部增设通气孔等，都可以改变流场的空化特性。

（时启燧）

kongkou chuliu

孔口出流（orifice flow）通过水库或容器中各型孔口的泄流。孔口出流视其水库上游水位或容器中压强是否变化，分为恒定出流和不恒定出流；视其下游水位是否影响孔口泄流能力，分为淹没出流和自由出流。水利水电工程中为控制和调节流量而设置的各种孔口，通常都视作水头为恒定的，主要有两大类：深孔出流和闸孔出流。

（1）深孔出流。如容器或水库的放空孔，船闸的充泄水孔，测量流量用的孔板、管嘴等的出流。孔口断面形状有圆形、方形等；孔口边缘有薄壁（锐缘）、厚壁或修圆（短管嘴）等不同情况。深孔出流的流量公式，为

$$Q = \mu A \sqrt{2gH_0}$$
 (1)

式中 $H_0 = H + \frac{\alpha v_0^2}{2g}$ ， H 为从孔口中心（底部孔口垂

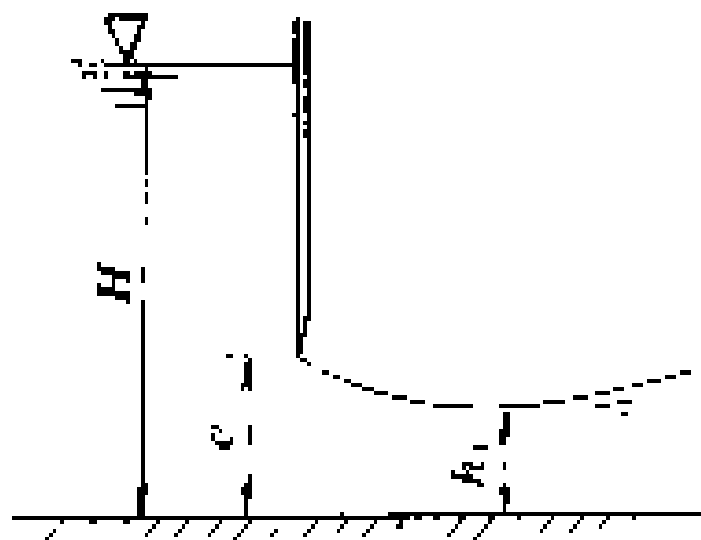


图1 平底平板门

直出流时，取孔口以下 $d/2$ 处的收缩断面）算起的作用水头， $\frac{\alpha v_0^2}{2g}$ 为趋近流速水头（ α 为流速分布不均匀系数）； A 为孔口断面积； μ 为流量系数（典型的圆形薄壁小孔口 $\mu = 0.60$ ，标准管嘴 $\mu = 0.82$ ）。

（2）闸孔出流。最具代表性的是二维平底锐缘平板门局部开启（开度 e ）时的恒定自由出流（图1）。闸

孔上游来流受孔口附近急剧变化的边缘约束而收缩，在过闸后下游 $(0.5 \sim 1.0)e$ 处出现小于开度 e 的收缩水深 h_c ，闸孔出流的流量公式为

$$Q = bh_c v_c = \varphi \epsilon b e \sqrt{2g(H_0 - h_c)}$$
 (2)

式中 b 为闸孔宽度； V_c 为收缩断面的流速； ϵ 为收缩系数； φ 为流速系数。若令 $\mu = \varphi \epsilon \sqrt{1 - \frac{h_c}{H_0}}$ ，则上式化为一般孔口出流的流量公式，即式（1）。几种常见闸孔体型的流量系数 μ 值见表及图1、2、3。如果孔口为淹没出流，实际计算时应引入淹没系数 σ_s 。

闸孔出流 μ 值表

类 型	μ 值关系式	适用范围
平底锐缘平板门 自由出流	$\mu = 0.6 - 0.176 \frac{e}{H}$	$0.1 < \frac{e}{H} < 0.65$
平底弧形门 自由出流	$\mu = \frac{0.47 + 0.22 \cos^2 \alpha}{(e/H)^3}$	$\frac{e}{H} \leq 0.7$ $15^\circ < \alpha < 90^\circ$
实用堰上平板门 自由出流	$\mu = 0.65 - 0.186 \frac{e}{H}$	

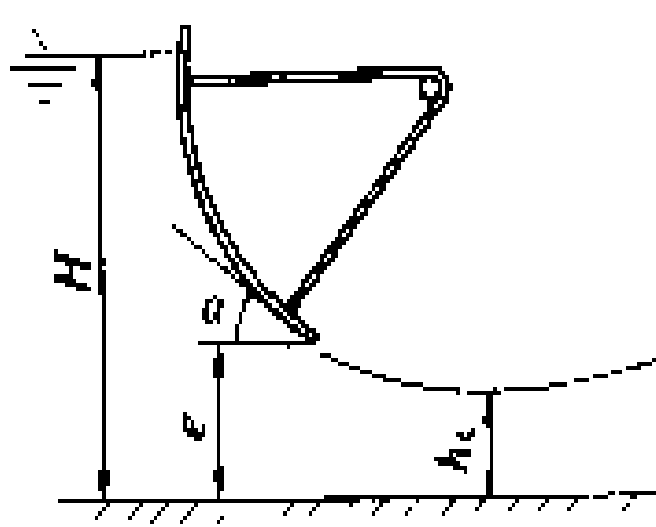


图2 平底弧形门

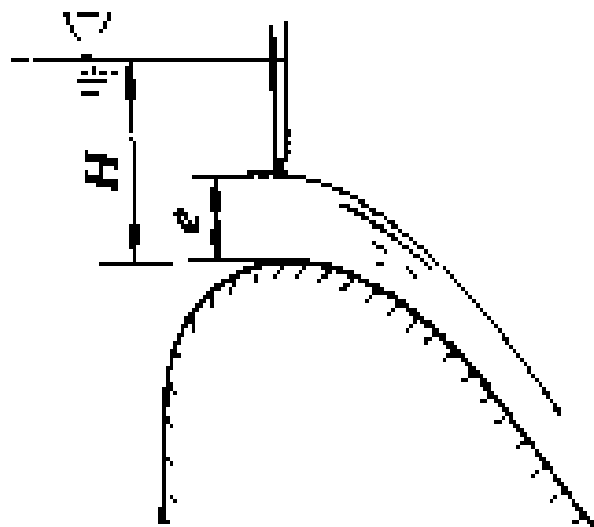


图3 堰顶平板门

工程实践中，水库放空或船闸充水、泄水等的水力设计，由于水头逐渐变化而形成非恒定的孔口出流，但是由于水库或闸室面积远大于孔口面积，闸前水位变化比较缓慢，实际计算时可用近似分析法，把孔口非恒定出流的过程化分为许多时段，在各时段内按恒定出流处理。

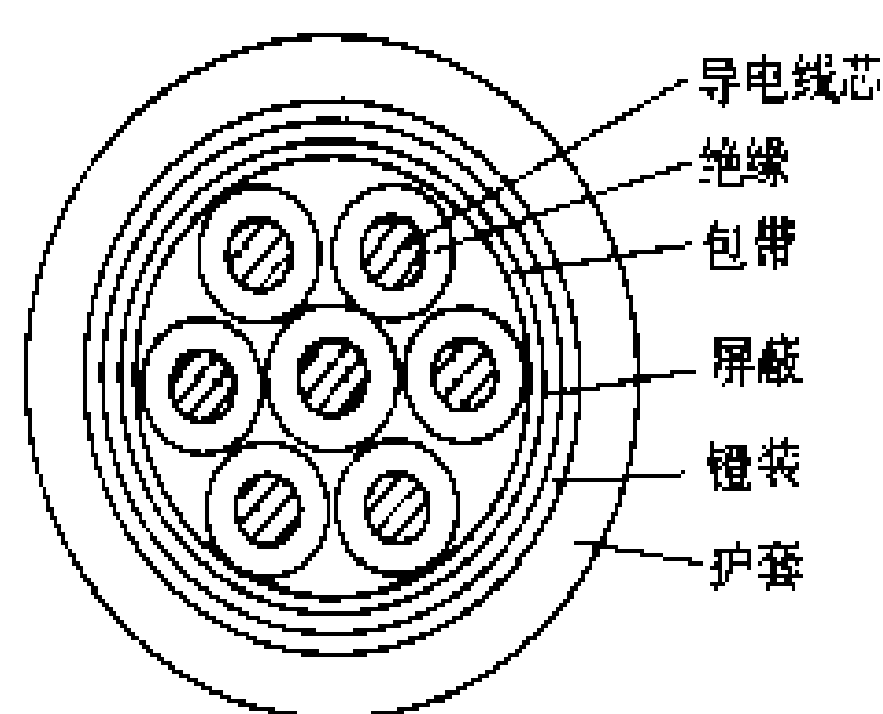
（时启燧）

kongzhi dianlan

控制电缆（control cable）传递控制、测量、保护和信号等载流信息的多芯电缆。工作电压为交流 500 V 或直流 1000 V 以下，工作电流或载流量由截面决定。电缆由导电芯线、绝缘层和护套三个基本部分组成。导电芯线一般为单股铜线或铝线（软电缆则为多股细铜线）、芯线外有绝缘层，电缆外有护套。绝缘层和护套常用的材料有橡皮、聚乙烯和聚氯乙烯等，也有用铅包作护套的。有些电缆在护套内或

外还加有钢带或钢丝铠装,还有些电缆在绝缘层和护套之间加设铜丝编织或铜带缠绕的屏蔽层。控制电缆的结构如图所示。电缆的线芯截面一般为 $0.5 \sim 10 \text{ mm}^2$, 线芯截面为 $0.5 \sim 1.5 \text{ mm}^2$ 的电缆芯数一般可为 $2 \sim 61$ 芯,而对于截面为 $6 \sim 10 \text{ mm}^2$ 的电缆芯数一般为 $4 \sim 10$ 芯。

选用控制电缆一般要考虑:①机械强度。由于控制电缆截面较小,而可靠性要求较高,根据中国有关规定:一般选用铜芯电缆,连接于强电端子的芯线截面不



控制电缆结构简图

应小于 1.5 mm^2 , 连接于弱电端子的芯线直径不应小于 0.5 mm , 电流互感器二次侧连接电缆芯线截面不小于 2.5 mm^2 。②负载能力。电缆的工作电流、回路压降、回路电阻都应在容许范围之内。对于连接电流互感器二次侧的电缆,应按测量或保护的准确级别的要求校验其截面。连接电压互感器二次侧的电缆,应校验其电压降;用于表计测量回路,则应与表计测量精度相适应,用于计费电能表,压降不应大于额定电压的 0.5% ;用于继电保护和自动装置,一般不应大于 3% ;用于控制回路一般不应大于 10% 。③敷设条件。电缆敷设时可能遭受机械损伤或使用中有防虫、鼠咬的要求时,应采用裸钢带铠装电缆;地下直接埋设的电缆应有带护层的钢带铠装;要承受机械应力的应采用钢丝铠装电缆;有抗电磁场干扰要求的应采用屏蔽电缆;移动式设备应采用软电缆。④电缆配置。一般情况下,交流和直流、电压和电流、强电和弱电以及不同安装单位的回路、不宜共用一根电缆。⑤芯数。根据需要选用不同芯数的多芯电缆,以减少电缆根数,电缆一般应留有备用芯,但同一安装单位,有相同起止点的电缆,不必每根都留有备用芯,安装条件较好,芯数不多的电缆亦可不留备用芯;所选用的电缆,其芯数种类和规格不宜太多。

随着计算机技术的应用,设备之间的连接关系发生了很大的变化,除了监控系统与生产过程设备及常规的显示、指示设备用控制电缆连接外,系统内部可以采用串行或总线等计算机通信连接方式。而且传送的不再是电气模拟量,而是信息码,传送的功能大大加强。常用的连接电缆有双绞屏蔽电缆、同轴电缆和光纤电缆等,这样可以用少量的连接电缆传送大量的信息,改善信息传送条件,而电缆及其敷设费用可大为减少。

(梁见诚)

kongzhi dianyuan

控制电源 (control power source)

水电站控制、保护、信号、测量系统及装置的工作电源。控制电源有直流和交流两类。直流控制电源主要来自蓄电池,也有来自交流整流装置和直流-直流变换装置。交流控制电源主要来自厂用电,还可由直流电动机-交流发电机组和直流-交流逆变装置提供。

直流控制电源 要求在电站正常或事故运行情况下,保证供电可靠。

直流额定电压 大、中型水电站直流控制电源的额定电压一般采用 220V , 外国也有采用 250V 的;但对中、小型水电站可采用 110V , 外国也有采用 125V 的。对于采用弱电控制的水电站还设有 60V 以下的弱电直流电源,通常采用 48V 。

蓄电池组直流电源 水电站采用的蓄电池有铅酸蓄电池和碱性蓄电池。蓄电池组数和容量将根据电站装机容量、机电设备配备情况和枢纽布置确定。为了保证蓄电池正常工作尚需配置充电和浮充电装置。(见用电卷蓄电池)

(1)铅酸蓄电池。水电站曾经采用固定开口容器的铅酸蓄电池。目前大部分已被防酸隔爆式固定铅酸蓄电池或密闭防爆式铅酸蓄电池所替代,这类蓄电池上方装有防酸隔爆帽,酸雾不易逸到电池外部,可减少酸雾对蓄电池室及设备的腐蚀。后者还设有消氢帽以减少或防止氢气逸出。国内外还生产了密封免维护铅酸蓄电池,电池密封,无酸雾溢出,正常充电无气体逸出,不必加水,无需维护,不会对设备和人员造成危害。带干荷的铅酸蓄电池也已制造生产,这类蓄电池出厂未加电解液已带有电荷,用户在安装投运前只需加电解液充电 6h 左右即可投入运行,省去了投运前的充电-放电-充电的较长时间。

(2)碱性蓄电池。近年来在水电站已逐步推广使用碱性蓄电池。它具有自放电小、体积较小、寿命长、运行维护方便等优点。但存在效率、电动势较低,充电容量较大的缺点。

(3)蓄电池组数。在中、小型水电站一般只装一组蓄电池。对于占电力系统容量较大的大型水电站需装设两组蓄电池。以往中国电力系统装机容量较小,因此规定在 150MW 以上的水电站装设两组蓄电池,由于电力系统装机容量不断增大,已规定在 250MW 及以上的水电站装设两组蓄电池,有的国家规定在 500MW 及以上的水电站装设两组蓄电池。对于装机容量很大,机组台数较多,一个电站多个厂房及开关站远离厂房时,还可装设两组以上蓄电池。同一直流系统的两组蓄电池在正常情况下,是同时运行的。只装一组蓄电池时,以往均带端电池并装设端电池调节器以改变端



电池个数, 来保证在事故或核对性放电及充电时母线电压维持一定水平。因端电池经常处于闲置状态, 自放电得不到及时补充, 容易硫化, 寿命短。近来国内外均提出取消端电池的作法。除设法提高蓄电池最低电压值、降低最高电压值外, 还装设了由硅二极管组成的降压装置, 以便按电压偏差大小, 增减硅二极管串联数进行降压。具有硅二极管组成降压装置的一组蓄电池的接线见图 1。

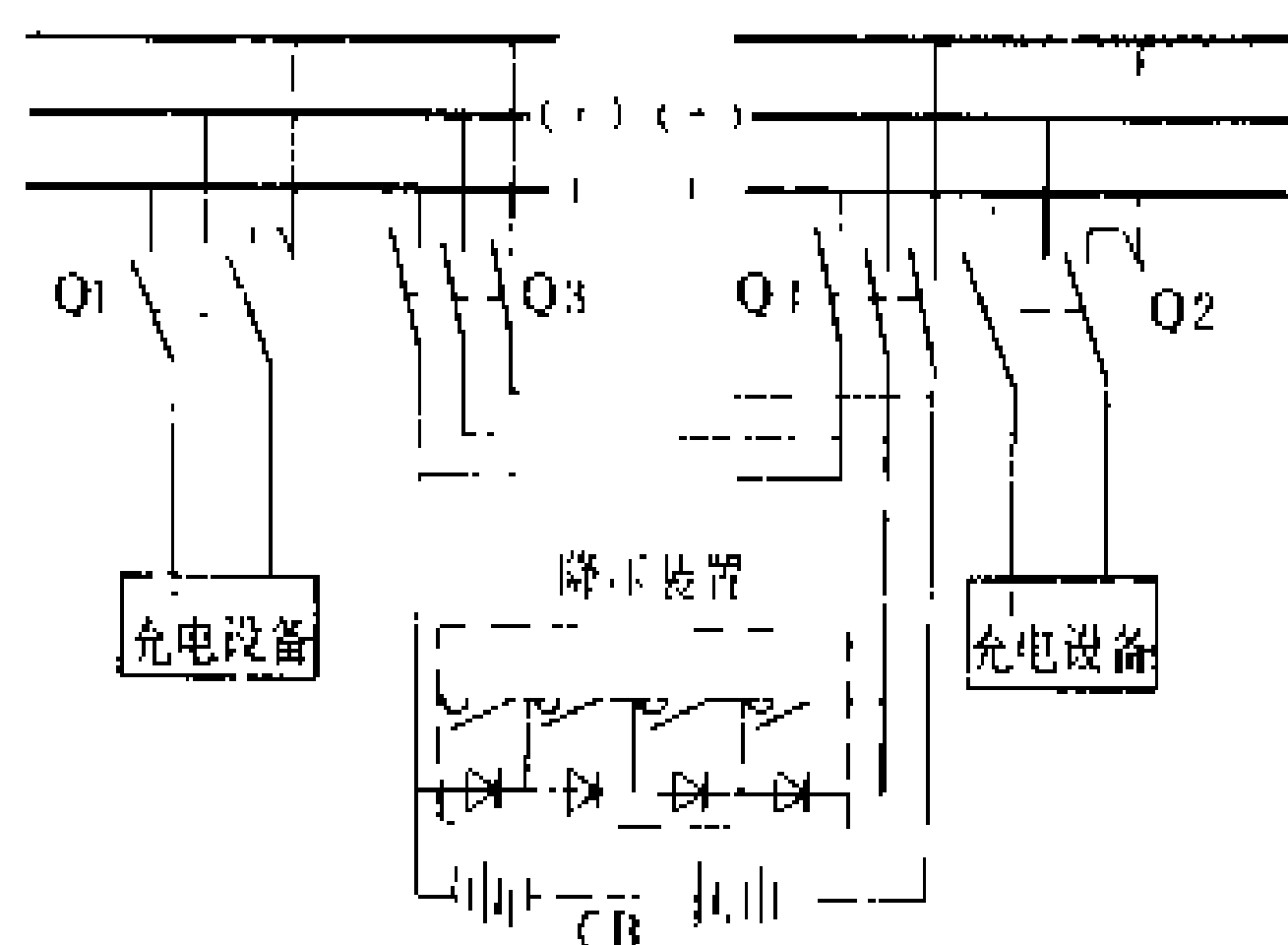


图 1 具有硅二极管组成降压装置的一组蓄电池接线

(4) 蓄电池组电池个数。蓄电池组电池个数按两种情况分别选定: ①同一直流系统装有两组及以上的蓄电池则不带端电池, 蓄电池经常处于浮充电运行, 电池个数可按维持直流母线电压为 105% 额定值确定。②仅有一组蓄电池时, 电池个数以往是以保证在事故放电终了和充电末期均维持直流母线电压为 105% 额定值的条件确定。事故放电末期单个电池终止电压较低, 按此选定蓄电池总个数; 充电末期终止电压较高, 按此选定蓄电池基本个数。总个数与基本个数之间的个数差为端电池数。

(5) 蓄电池容量。蓄电池容量要满足: ①短时放电容量要大于全厂停电事故状态下最大放电电流和放电时间的乘积。②在厂用电全部消失时, 蓄电池放电 0.5 h 末期, 需满足恢复厂用电时具有最大合闸冲击电流的断路器合闸和发电机起动过程中起励 (如用蓄电池起励的话) 的要求; 国外对于无人值班的水电站, 在全厂停电事故后, 蓄电池的放电时间要考虑大于运行人员得到厂用电消失信息后返回电站的时间。③在接上最大冲击负荷时的直流母线电压应满足继电保护、自动装置正常工作的要求。

(6) 充电设备。蓄电池组安装好后需进行初充电, 在运行过程中需对各种负荷放电和蓄电池本身自放电, 还要定期进行核对性放电。为了进行初充电和放电后补充电能, 需装设充电和浮充电设备。在正常情况下, 蓄电池组与浮充电设备并联运行, 浮充电设备承担经常负荷并向蓄电池补充其自放电的电能, 这种运行

方式称为蓄电池组浮充电运行方式。

过去曾大量采用交流电动机-直流发电机作为充电及浮充电之用, 因有转动部件易磨损、维护量大, 现已淘汰。也曾采用汞弧整流器作为充电及浮充电设备, 但没有得到推广。目前在水电站已普遍采用硅整流装置作为充电和浮充电设备。有的晶闸管整流装置还可实现有源逆变, 以满足核对性放电时, 电能由直流侧经整流装置逆变成交流馈送至电网。

整流控制电源 在小型水电站中有时不设蓄电池组。但有些装置仍需直流控制电源, 因此采用下列装置:

(1) 电容储能装置。由交流电源供电经整流或直流作为合闸和控制电源, 在直流输出回路并接储能电容。

(2) 复式整流装置。合闸电源由厂用交流电源整流供电, 控制电源由厂用电、电压互感器及电流互感器联合供电经整流成直流电源, 在供电网络短路时由电流互感器提供电源经稳压整流向继电保护、自动装置等供电。

直流-直流变换装置 弱电系统、半导体继电保护装置和自动装置不一定均设置专用的蓄电池组, 而由直流-直流变换装置供电。变换装置输入直流电压为 220 V、125 V 或 110 V, 直接由蓄电池组供电, 经逆变成成为某一频率的交流电, 再经整流成所需电压值的直流。供控制、保护、信号等系统使用。

交流控制电源 水电站的设备除由直流电源控制外, 尚有许多设备的控制需用交流电源。交流控制电源可直接由厂用电提供, 也可由直流电动机-交流发电机组和逆变装置供电。

厂用电交流控制电源 它主要用来控制下列设备:

(1) 交流接触器、磁力起动器的吸引线圈是由 127 V、220 V、380 V 交流电源供电的, 有的交流接触器配置的控制电动机则由 220 V、380 V 交流电源供电。

(2) 配备弹簧操动机构的断路器, 大部分采用 110 V、220 V、380 V 交流电作为合闸电源, 而采用 110 V、127 V、220 V、380 V 交流电源进行跳闸。配备液压操动机构的断路器的油泵电动机有的是由 220 V、380 V 交流电源供电的。

(3) 隔离开关的操动机构大部分采用 220 V、380 V 交流电源进行分、合闸。

直流电动机-交流发电机组 为了抑制干扰, 计算机监控系统、巡回检测装置等信息处理装置的电源不宜直接来自厂用电。可由直流电动机-交流发电机组供电。其主要特点是①可消除其他用电设备对信息处理装置的干扰。②发电机组具有一定飞轮惯性, 倒换电源时, 直流电动机-交流发电机组仍能维持短时供电, 使

信息处理装置不中断电源。但直流电动机-交流发电机组有转动部件、易磨损、增加维护工作量，而且产生噪声，因此有逐步被取代的趋势。

直流-交流逆变装置 它主要由晶闸管、大功率晶体管或场效应管等静态元件制成，由蓄电池组供电经逆变成 50Hz 的工频交流电，供信息处理装置、通信设备等用电。如有必要亦可由逆变装置逆变成任一频率的交流电。

不间断电源 不间断电源 (uninterruptible power system, UPS) 是一种输出电压和频率恒定，并在交流供电电源消失的情况下，能继续向负荷提供一定时间电能的交流电源。它是由把交流整流成直流的整流装置、把直流变成交流的逆变装置及蓄电池等部分组成，如图 2 所示。正常情况下，交流供电电源经整流成直流再逆变为交流向负荷供电，蓄电池处于浮充电状态。当交流供电电源消失时，由蓄电池所供的直流逆变成交流向负荷供电。因此，静态开关 I 是经常开通的，至于静态开关 II 有两种工作方式：①正常时是断开的，切断交流供电电源直接供电回路，当逆变装置发生故障迅速关断静态开关 I 的同时使静态开关 II 开通，由交流供电电源向负荷供电；②正常时与静态开关 I 一样处于开通的，使两个电源并联运行。不管哪一种运行方式，均须由锁相控制环节来保证两个电源保持同步。

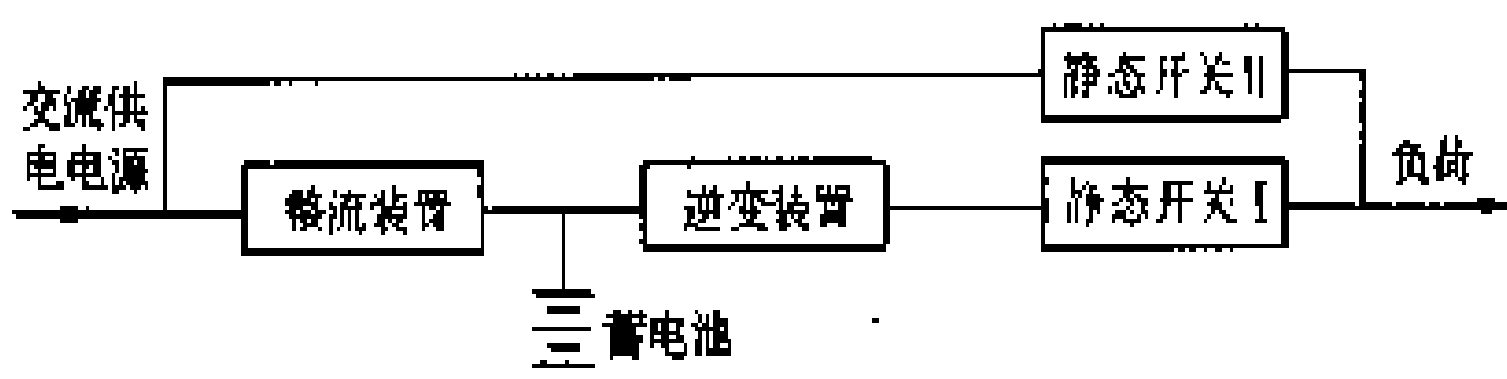


图 2 不间断电源系统框图

(张德平)

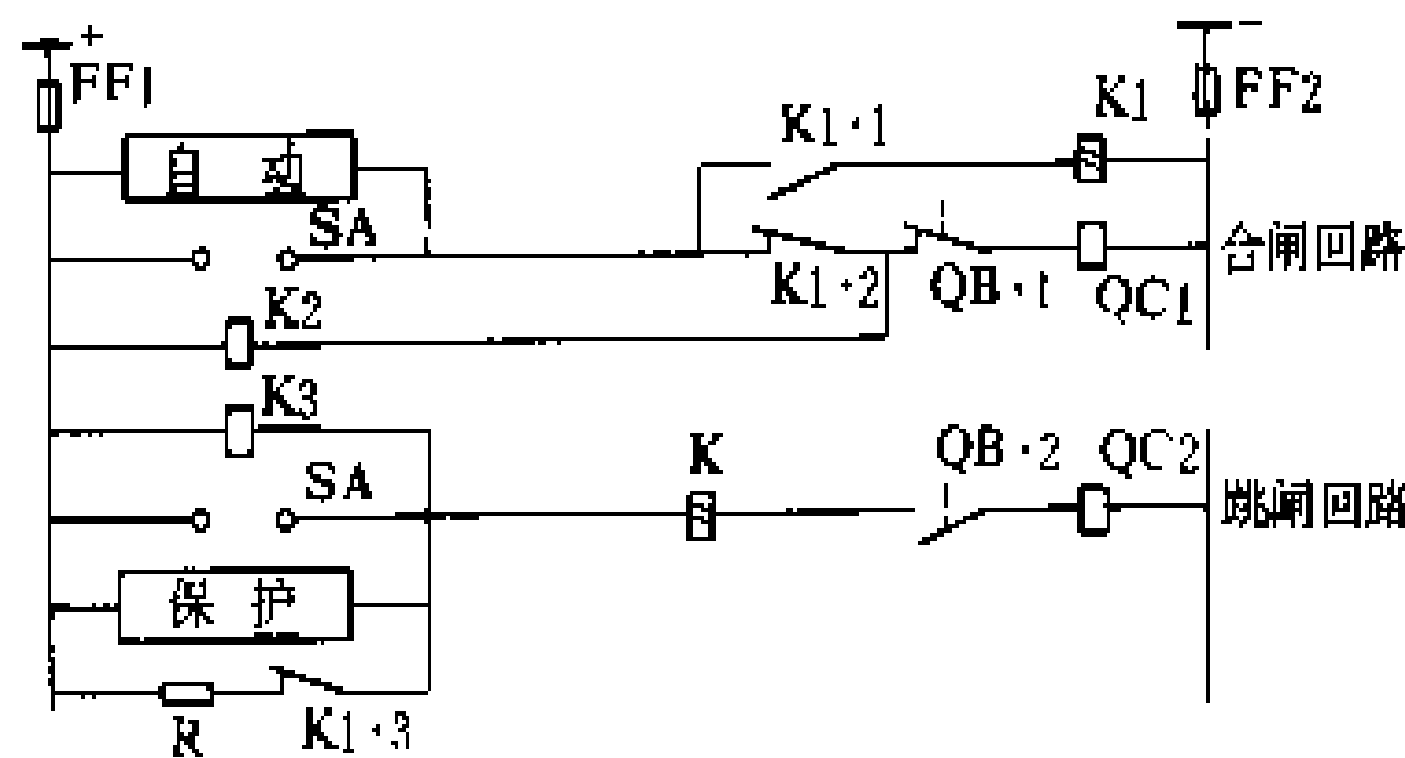
kongzhi xitong

控制系统 (control system) 由一个场所对水电站内主要机电设备进行控制的技术。它包括工况转换和控制方式两方面的内容。工况转换又包括水轮发电机组和抽水蓄能机组工况转换控制、功率调节以及断路器、隔离开关等的控制；控制方式包括强电控制、弱电控制和计算机控制（见水电站计算机监控系统）。

机组工况转换控制 水轮发电机组工况转换（见水轮发电机组自动控制）和抽水蓄能机组的工况转换（见抽水蓄能机组起动方式），都通过控制用的器件和装置来实现。在正常情况下，对于大、中型水电站的机组工况转换除由电站的自动装置自动控制外，一般是在中央控制室进行集中控制。也可在机旁或就地控制。

功率调节 分有功功率和无功功率调节。除自动装置自动调节外，一般在中央控制室和机旁均可调节。

断路器控制 其控制回路如图所示。图中手动控制开关 SA 在水电站一般采用自复式，QC1 和 QC2 分别为合闸和跳闸接触器，K2 和 K3 分别为合闸回路和跳闸回路监视继电器，具有双线圈的继电器 K 是构成电气防跳跃闭锁回路的器件，QB·1 和 QB·2 是断路器辅助触点。设置电气防跳跃闭锁回路的目的是为了防止断路器出现多次合闸-跳闸而遭损坏。例如，当手动合闸时，（先不考虑 K1 及其触点），合闸回路的 SH 给合闸接触器 QC1 以电源，断路器合闸；若合闸于故障线路上，继电保护装置动作，给跳闸接触器 QC2 以电源，使断路器跳闸。此时，若 SA 仍接通，则当断路器跳闸、其辅助触点 QB·1 又闭合时，断路器又合闸，接着保护动作又跳闸，此即出现多次合一跳的跳跃现象。为此，接入继电器 K1，当合闸后保护动作跳闸时，在跳闸回路中的 K1 线圈也带电，K1·2 动作断开合闸回路，K1·1 动作将 K1 自保持，从而防止了多次合闸。有的断路器也有采用机械防跳跃闭锁装置的。对于分相控制的断路器跳、合闸回路监视继电器和防跳跃闭锁装置需按相分别装设。除 6~10 kV 线路断路器一般在配电装置处控制外，其余断路器通常均在中央控制室或集中控制点控制，也可就地控制。



断路器控制回路图

隔离开关控制 用来改变电气设备运行工况的隔离开关，诸如电气制动用的三相短路开关和抽水蓄能机组变速换极开关、换相隔离开关、起动开关等均按控制程序由机组自动控制装置进行控制，也可就地控制。不用于改变设备工况的发电机电压系统的隔离开关一般均就地控制。用于检修设备时隔电用的隔离开关，过去大部分只考虑就地控制，现也逐步实现由中央控制室远方控制。不论控制方式是自动、远方还是就地控制，控制隔离开关时，主回路中不允许带有负荷，它的控制回路需与相应的断路器相闭锁，只有断路器跳开后，才允许控制隔离开关。为检修设备安全接地用的接地隔离开关需与隔离开关主刀闸机械联锁，主刀闸打开后，接地隔离开关才能合上而接地，反之接地隔离开关打开后，才允许主刀闸合上。



强电控制 控制电源为直流 110、125 V 和 220 V;交流 110、127、220V 和 380 V。一般采用一对一控制,即每个控制对象要装一个控制开关或按钮。由于原来强电控制开关和按钮尺寸大,因此控制屏台的尺寸也要大,给集中控制和事故处理带来不便。在大、中型水电站的中央控制室中通常设有集中控制台,为了使运行人员可以坐在集中控制台前对全电站主要设备进行控制,集中控制台的尺寸不能太大。这不仅要求布置紧凑,而且要求控制器件的尺寸要小。所以使用了强电小型开关,形成强电小型开关集中控制。强电小型开关是新生产的一种控制器件,其控制功能和使用电压与原强电控制器件相当,但尺寸减小。

弱电控制 控制电源为直流 60V 以下,通常为 48 V。随着电站装机容量的加大和设备的增多,集中控制台上的控制器件也随之加多,为了不使集中控制台面积过分加大采用了弱电控制,因为弱电控制器件的尺寸较强电小型开关小,布置也可更为紧凑。弱电控制可以采用一对一控制,也可采用弱电选线控制。弱电选线控制可以进一步缩小控制、监视面积。按控制的选线功能可分为选控、选调和选测。①选控。对某些数量多、距控制场所远的设备采用选控。弱电选控应有在同一时间内只允许选中一个对象的闭锁,并要有明显的灯光信号指示被选中的对象供核对。选控是按步进行的,先选对象,经核对无误后,再选控制性质并执行控制指令。指令执行完毕,自动或手动复归至控制前的状态。②选调。选调可分为先选对象再选调节性质和先选性质再选对象两种方式。前者可在选定对象后对任何调节参数进行调节,这对机组检修后的试运行和手动准同步较为方便;后者在选定调节性质的情况下,不需倒换就可调节任一台机组的选定参数,这对运行中的机组间倒换负荷较为方便。③选测。为了适当减少仪表数量,对于不需要经常监视的电气量可采用选测。选测装置由选测仪表、变送器(或电压互感器二次电压)和切换开关(或按钮、继电器)组成。为了避免两个电气量同时接至仪表,需加机械、电气闭锁以保证任何时候只能有一个电气量加入仪表。

(张德平)

kongzhixing jindu

控制性进度 (key work schedule) 在水电站施工总进度中决定施工程序、速度及各期工程形象面貌的各项关键工程阶段的工期计划。它是施工总组织设计与施工管理工作中的基本依据。在主体工程、准备工程、施工导流工程和各项辅助工作中,那些工期长、工程量大、施工难度高、可变因素多、对施工总工期和工程项目衔接起制约作用的环节,都有可能成为

控制因素。它也与枢纽布置的类型、工程特性、施工条件及建设要求有关。在水电站施工全过程中,其主要控制阶段大致可归纳如下:①对外交通及施工用电投产期、人员及机械设备进场期。②导流工程开工到截流。③大坝正式开工、基坑进行开挖到坝体开始填筑(或引水系统工程及发电厂房正式开工)。④输水进水口及尾水工程完建期。⑤水轮发电机组开始安装。⑥坝体拦洪渡汛到水库蓄水。⑦永久泄水建筑物投产期。⑧第一台机组发电到工程竣工。此外,由于水电站是综合性开发工程,除保证发电进度外,还要兼顾过坝交通、航运、灌溉、防洪及下游供水等条件。这就对水电站施工提出了控制水位和下泄流量等一系列要求,往往也构成控制工程进度的环节。

(章景安)

kudi qingli

库底清理 (clean-up of reservoir site)

在水库蓄水前对淹没范围地面上原有的建筑物、构筑物、漂浮物、障碍物、污染源、传染源及其传播生物的孳生地所采取的清理措施。旨在保证水电工程安全运行,防止水质污染,保护库周及下游人群健康;并为利用水库发展水产养殖、航运、旅游、水上运动等事业创造条件。

清理范围 根据水库的运用方式和库区各项事业发展的要求确定。常可分为一般清理和特殊清理两部分。一般清理范围包括正常蓄水位以下库底所有地域。在正常蓄水位至死水位(含极限死水位)以下 2m 的范围内,对各种建筑物及林木的清理标准适当提高。特殊清理,也称专项清理,具体的清理范围要按各项事业利用水库的规划设计,划定需要清理的地段或地带,如水产养殖场和捕捞场,游泳场和水上运动场,航运和港口、码头、渡口、供水工程的取水处等。

清理对象及措施 在中国一般按下述要求进行。①居民迁移期限和建筑物的拆除清理。对库区居民要限期迁出,一般要求移民与清理在蓄水前三个月完成,清库后在库区禁止入类活动,对居民点和地面上的一切建筑物、构筑物及其它各种设施,均应拆除,推倒摊平(土质残墙断壁者除外)或炸除。对水井、地窖、矿井及地下建筑物等需要填塞、封堵。②卫生清理。对人畜进行防疫;对污染物如粪便、污水、垃圾、尸体、有毒的化学品、工业废物以及污染源(如含有病菌、病毒及有毒元素的工矿企业、医院、兽医站、屠宰场、厕所、畜圈、坟墓等)采取清除、消毒、集贮、覆盖等措施;对人、畜患传染病死亡的葬地,应严格消毒或无害化处理;对传染病流行区需在疫源地(如对水深不到 1.5 m 的浅水区可能形成孑孓、钉螺等)采取工程技术措施或

化学药物清除媒介生物及其生存条件。③林地清理。对森林、疏林、薪炭林、经济林以及其它林木进行采伐、清理并运出库外,不留枝桠。④其它清理。如焚烧秸秆、旧房残料及漂浮物,清除或焚化泥炭等。⑤特殊处理。如对天然障碍物清除的特殊要求及在一定的范围内进行场地平整及铺盖砂砾料等。

(张根林)

kuqu zonghe kaifa

库区综合开发 (comprehensive development of reservoir) 利用水库的水域、水体和出露的地面以及库周的自然资源,在保证水库设计功能的前提下,发展多种经营事业。因水库形成后,改变了库区及四周原来的生态环境,形成了新的生态系统,有利于综合开发库区的水土资源、林业资源和风景资源,有计划的发展种植业、水生养殖业、水运业、林业、畜牧业以及旅游业。这是兴建水电工程效益中不可忽视的一个方面,是水库淹没所获得有利成果的一部分。在中国,开发利用各项事业的措施有以下几个方面。

(1) 库区土地利用可结合移民安置。根据土地利用的效益进行规划与合理使用。按库区的不同部位可划分以下几个利用区:①水库正常蓄水位至死水位之间的消落区。每个水库消落区土地能否利用和可能利用的程度,取决于水库的调节性能及运用方式,库区不同高程土地出露的周期变化规律及持续时间(季节和天数),以及地形、气候、土壤、作物耕作制度等条件而定。在一个具备利用条件的水库区,也有常年利用和季节性利用的差别。为了提高种植率和收获率,可以改变耕作方式,选择能适应的农作物,必要时设置临时性的排灌设施。②正常蓄水位以上至土地征用线之间的临时淹没区。这个区域的土地,在每年的非汛期均出露于地面,在汛期只受洪水短时淹没。地面高程高的部位,多数年份可常年利用,为了适应洪水临时淹没,可种喜水作物及耐水性强的高秆作物。③高于库水位以上孤岛区的宜耕、宜林土地,可继续利用或开发垦植,面积较大的岛屿可安置移民。④浸没区的土地,可采取措施降低地下水位及改良土壤,种植耐碱性、喜水性作物,改旱地为水田或改建为鱼池等。

(2) 发展水生动物和水生植物。由于水库水温升高,水体透明度增加,库底土壤肥沃,无机盐类和有机物质较丰富,浮游生物及水草易于生长繁衍,饵料多,水质肥,有利于发展水生养殖业。计有渔业、水禽业和水生植物种植业三方面:①渔业。由于水面宽阔,水体深邃,可按各种鱼类栖息的食性不同,合理搭配,立体养殖。养殖方式,有大库放养,库湾、库汊拦养及网箱精养。捕捞区及渔场应进行彻底的库底清理。建立天然

产卵场及人工鱼种场,库湾库汊拦截工程。库区防逃设备。以及鲜货贮藏与加工设施,渔政管理等。②水禽业。在库边可以大量饲养鸭、鹅,还可驯养野生水禽,生产肉类和蛋类。③水生植物种植业,利用库边浅水区种植莲藕、湖菱及供饲料用的各种水草。

(3) 发展航运。兴建水库为发展航运提供了有利条件。组织库区航运有开放式和封闭式两种,前者为水库区与上下游的河道均可贯通,后者是在天然状态时为不能通航的河流,建库后也只能在库区的范围内开辟航运。发展库区航运需要改建或新建航道设施、港口、码头。如水陆联运,需要修建连接道路。为适应库水位的涨落变化,建筑码头以斜坡道式为宜。在多沙河道的水库尾部,因泥沙淤积的影响,使航道不能长期稳定,必要时需采取疏浚措施。

(4) 发展林业绿化库区。利用库区岛屿与库周荒山陡坡植草植林,营造经济林、用材林、薪炭林、灌木林以及草场。有利于库岸稳定,减少水土流失,净化、美化水库的环境。

(5) 发展旅游、疗养及水上运动。利用水库区及周围的湖光山色,自然景观,结合库周的名胜古迹,选定一些景区,开创旅游业,建立疗养地,发展第三产业。利用水库宽阔的湖面,可以发展多种水上运动,如游泳、水球、划船、汽艇及摩托艇,根据各自需要选定不同区域,开展体育训练和比赛。

(张根林)

kua liuyu yinshui fadian guihua

跨流域引水发电规划 (hydropower development planning in interbasin water transfer project) 研究将一个流域的水量引至另一个流域利用的必要性、经济性和技术可行性并制订实施方案的设计工作。

跨流域引水的目的有:①从一个流域向另一流域补充水量,以满足该流域用水部门的需要;②利用相邻的两条河流之间天然水位差引水发电;③将相邻两条河流的水量集中于一条河流上建水电站,以减少分别在两条河流上建水电站的工程量和投资;④沟通两个流域的航运。

跨流域引水发电规划工作包括:①水资源平衡;②引水路线选择;③引水工程设施规划;④环境影响评价;⑤经济评价。

目的 主要有供水、发电、航运等几个方面。

(1) 供水。由于地形、气候等各种原因,各个流域的水土资源差异较大。有的流域天然径流不能满足本流域工农业及城乡各用水部门的需求,制约地区经济发展;有的流域天然径流在满足本流域用水后仍有余。

跨流域引水可调剂两个流域水量的余缺。例如中国于1983年和1985年先后建成的引滦入津和引滦入唐工程,由滦河引水入海河流域的天津市和陡河流域的唐山市,年供水量分别为10亿 m^3 和3亿 m^3 ,以缓解两座城市的用水紧缺问题。

(2)发电。相距较近而水位高程相差较大的两条河流,具有良好的水能开发条件。采取工程措施从海拔较高的河流引水至海拔较低的河流发电,有时是经济的。例如中国的以礼河梯级水电站就是从金沙江支流以礼河引水至金沙江的支流小江发电。以礼河梯级水电站共有4级。在以礼河上建一座具有多年调节水库的一级(毛家村)水电站,在其下游即利用以礼河至小江高达1380m的落差建设二级(水漕子)、三级(盐水沟)、四级(小江)共3座水电站。以礼河梯级水电站总装机容量32.15万kW,年平均发电量16亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。有些相邻的河流流域面积均不大,径流量较小,若在两条河流上各自建设梯级水电站,则各个河流的水电站规模均较小。有时将水量集中于一条河流,建梯级水电站,可能是经济的。例如中国吉林省的第二松花江上游漫江和松江河流域面积分别仅为2781 km^2 和1900 km^2 ,经过研究,确定了从漫江引水至松江河,集中两条河流的径流在松江河建水电站的方案,即在漫江的松山建水库(坝址以上流域面积为1302 km^2),用隧洞引水至松江河的小山水电站水库,在松江河上建4座梯级水电站。

(3)航运。以通航为目的建设的运河,将分属不同流域的河道相贯通,亦属于跨流域引水的范畴。例如中国的南北大运河、俄罗斯的伏尔加—莫斯科运河、可使里海和黑海航道连通的伏尔加河—顿河运河以及德国横贯东西(由莱茵河跨埃姆斯河、威悉河、易北河而达奥得河)的运河等。

工作内容 主要有以下几个方面。

(1)水资源平衡。跨流域引水规划需进行引水流域和受水流域的天然径流和需水量分析,通过两个流域的水资源平衡研究合理的引水量。

(2)引水路线选择。引水路线选择包括引水流域引水口位置及受水流域受水地点,以及连接两端的经济合理的渠道或隧洞等输水建筑物线路。引水发电规划需研究选择经济合理地利用两条河流之间落差的开发方案。

(3)引水工程设施规划。包括引水工程首部枢纽(坝或闸)、输水隧洞或渠道及水电站的工程规划。对于以供水为目的的引水规划,当两个流域河流之间高差不能满足引水要求时,在引水流域河流上建坝壅高水位或者在引水流域河流上或输水建筑物沿线建扬水站。

(4)环境影响评价。对引水后两个流域的生态环境等可能产生的影响进行分析,包括向其他流域引水后原河道下游径流量减少,甚至出现脱水段所产生的影响及可能采取的补救措施。

(5)经济评价。需对跨流域引水进行综合的国民经济评价和财务评价,论证其在经济上是否可行。

(赵毓昆)

kuiba hongshui

溃坝洪水 (dam-break flood) 大坝或堤防溃决造成的洪水。溃坝洪水具有突发性和来势汹涌的特点,其洪峰流量远大于暴雨或融雪形成的天然洪水,对下游工农业生产、交通运输及人民生命财产威胁极大,甚至造成毁灭性灾害。工程设计和运行中需要预估万一溃坝对下游的影响,以便采取必要的措施。溃坝原因概括为自然因素与人为因素两类。自然因素包括地震、特大洪水、库岸滑坡等;人为因素有勘探设计不周、坝基处理不当、泄洪设施不足、运行管理不善以及战争破坏等。溃坝洪水的大小与坝的壅水高度、库容大小、溃口形态、溃坝过程有关。溃口形态分为全溃与局部溃,峡谷区的坝一般是全溃,丘陵平原区的坝一般较长,只能局部溃。溃坝过程分为瞬时溃与逐渐溃,一般混凝土坝多为瞬时溃,土坝和堆石坝多为逐渐溃。

坝瞬时全溃时水流过程如图1。溃坝初瞬坝上游水位陡降,形成逆流负波向上游传播,相应水量下泄,波形随时间逐渐展平;坝下游水位陡涨,形成顺流正波,常出现立波(不连续波),水急浪大,伴有波的折射、反射、叠加和淤滚以及强烈的泥沙运动;经过较长



图1 溃坝水流物理过程示意图

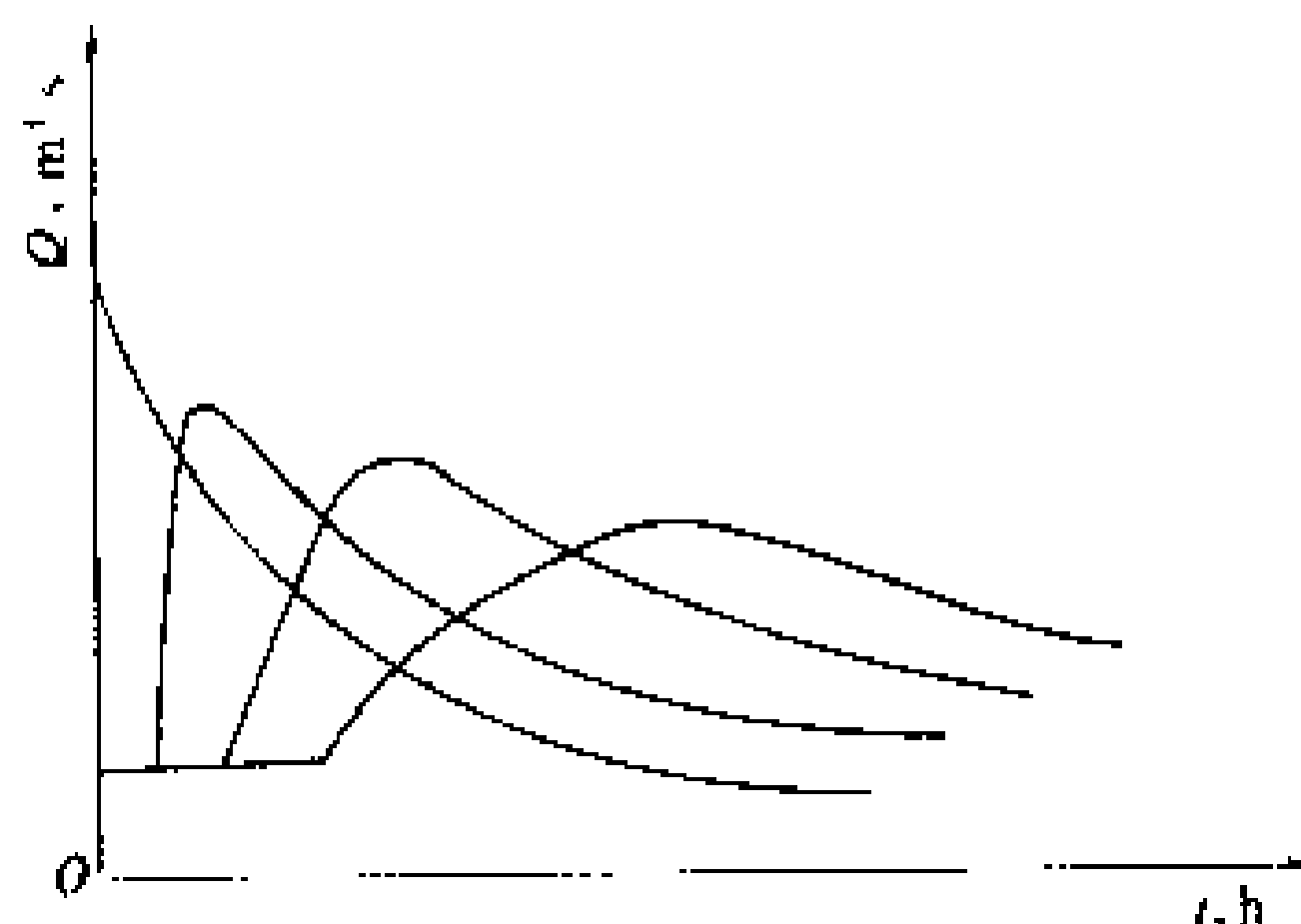


图2 溃坝坝址及下游各断面流量过程线

河段的槽蓄及河道阻力作用，立波不断衰减而消失。

瞬时溃坝最大流量出现在溃坝初瞬，其流量过程线成下凹形退水曲线，溃坝洪水波向下游传播的总趋势是不断坦化。逐渐溃坝最大流量一般出现在最终溃口形成的瞬时。当溃口尺寸相等时，渐溃最大流量要小于瞬溃的数值，且洪水过程线较瞬溃的平缓。见图 2。

溃坝洪水属河道不恒定流，计算分详算法与简算法。详算法是根据圣维南方程组(当瞬溃时应加入立波公式)用有限差分数值计算求解。简算法分溃坝最大流

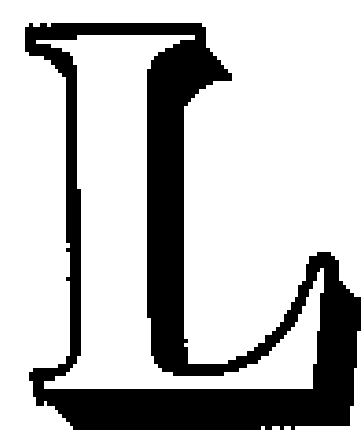
量、坝址流量过程线及下游演进 3 步计算。

溃坝洪水进入平原区，冲毁堤防，洪水漫流无明显流路，需用二维不恒定流方程组计算，也常用模型试验方法求解。

参考书目

电力工业部成都勘测设计院，水能设计，北京：电力工业出版社，1981

(唐友一)



Ladingmeizhou shuinneng ziyuan

拉丁美洲水能资源 (hydropower resources of Latin America) 据英国《国际水力发电与坝工建设》1993年手册统计,拉丁美洲具有水能理论蕴藏量 95000 亿 kW·h/a,技术可开发资源 40000 亿 kW·h/a,经济可开发资源 30000 亿kW·h/a。

拉丁美洲包括南美洲 12 个国家和中北美洲 15 个国家,陆地面积 2054 万 km²。拉丁美洲有世界最大河流亚马孙河。其年径流量达 69300 亿 m³,干流比降平缓,不易开发。上游在秘鲁、玻利维亚、厄瓜多尔、哥伦比亚等国的支流上的水能资源都很丰富。下游在巴西境内的许多大支流可开发 3170 亿 kW·h/a。

拉丁美洲若干国家的水能资源及其利用程度 (亿 kW·h/a)

国 家	理 论 蕴藏量	技术可开发 资 源	经济可开发 资 源	1991 年已 开发运行	开发利用 程 度 (%)
巴 西	30204	11949	11169	2490	20.8
哥 伦 比 亚	12900	5208	4182	242	4.6
委 内 瑞 拉	3350	2772	2617	365	13.2
墨 西 哥	5000	1596	994	252	15.8
智 利	2772	1810	1324	91	5.0
厄 瓜 多 尔	8185	5238	1206	51	1.0
秘 鲁		4120	1092	110	0.2
阿 根 廷	5350	1720	760	159	9.2
圭 亚 那			631	0.05	0.0
玻 利 维 亚	1780	1260	500	13.7	1.0
危 地 马 拉	954		434	20.9	
巴 拉 圭	507		396	24.3	
哥 斯 达 黎 加	1011	427	355	36.3	8.5
洪 都 拉 斯	1960		240	19.1	
乌 拉 圭	320	100	68	50.5	50.5
尼 加 拉 瓜	329	173	66	3.4	2.0

注:资料来源:英国《国际水力发电与坝工建设》1993年手册及各国资料。

拉丁美洲第二大河 奥里诺科河的年径流量 9140 亿 m³,上游在哥伦比亚境内,下游在委内瑞拉。其支流卡罗尼河分 7 级开发,可装机 24800 MW。其中

最大的古里水电站,装机容量 9100 MW。

第三大河是巴拉那河,干流流经巴西、巴拉圭、阿根廷等国,规划 10 级开发,可装机 37300 MW,诸支流可开发 30000 MW,合计 67300 MW。

其他如巴西的圣弗朗西斯科河、阿根廷的利迈河、墨西哥的格里尔瓦河等也有不少水能资源。

拉丁美洲若干国家的水能资源及其开发情况见表。

(高又生)

Lagelangde Erji Shuidianzhan

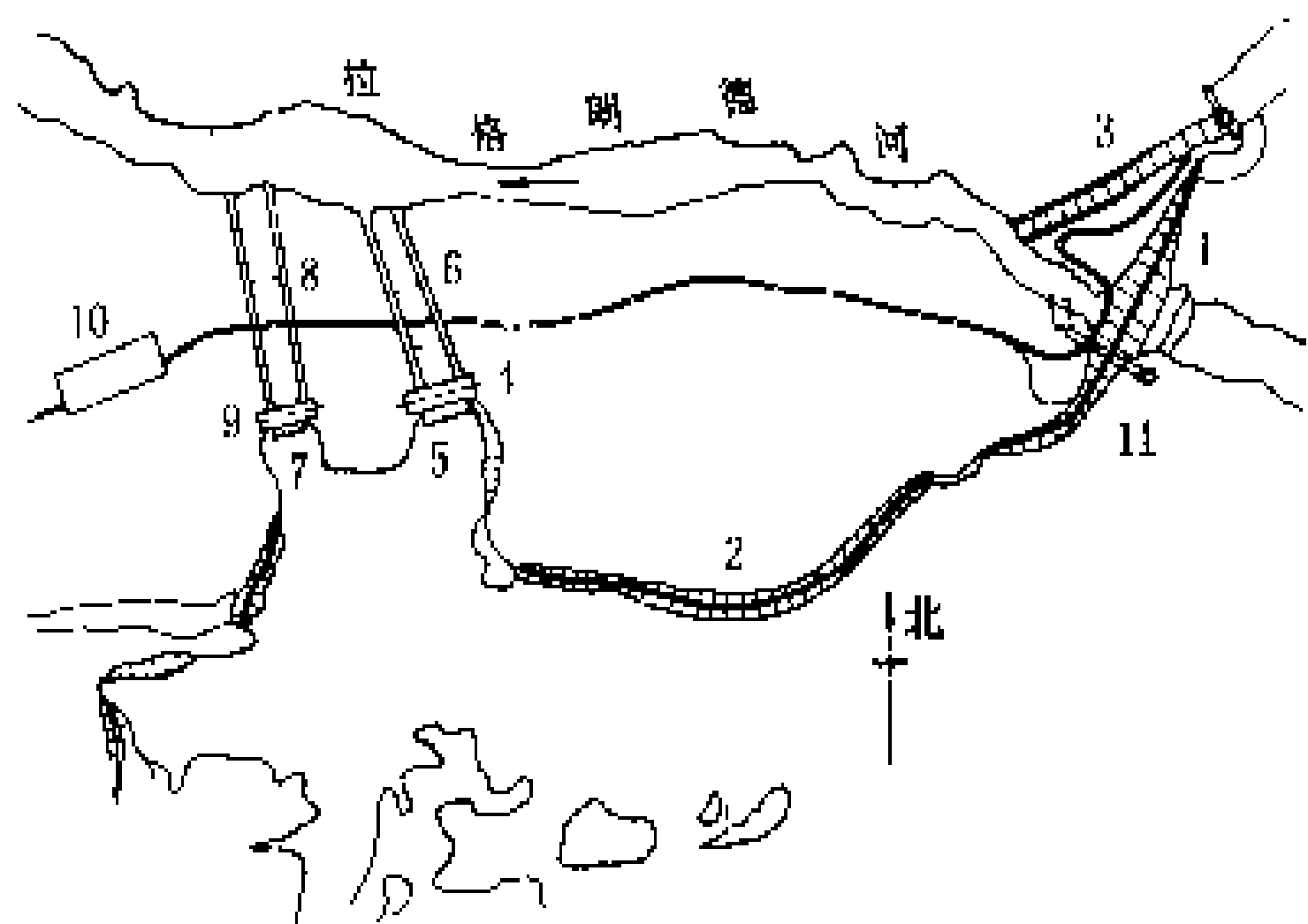
拉格朗德二级水电站 (La Grande 2 Hydropower Station) 位于加拿大魁北克省北部詹姆斯湾(James Bay)拉格朗德河下游。初期装机容量 5328 MW,年发电量 358 亿 kW·h。所发电力通过 735 kV 特高压输电线路送至蒙特利尔地区。输电距离 1100 km。主坝为斜心墙堆石坝,最大坝高 168 m。1971 年成立詹姆斯湾开发公司,开始施工准备,1973 年地下工程开工,1979 年开始发电,至 1982 年 16 台 333 MW 机组全部装完,总工期 9 年。1989 年进行二期工程,计划再装 6 台 333 MW 机组,1992~1993 年投入,使电站的总容量达到 7326 MW。

水文和水库特性 拉格朗德河总流域面积 9.8 万 km²,平均年降水量 750mm,多年平均年径流量 536 亿 m³。另从相邻的卡涅皮斯考(Caniapiscou)河和伊斯特门(Eastmain)河跨流域引水 391 亿 m³,使总年径流量达 927 亿 m³。拉格朗德二级水电站坝址在河口以上 117 km 处,多年平均流量 2920 m³/s。正常蓄水位 175.3 m,相应库容 617 亿 m³,死水位 167.3 m,调节库容 193.6 亿 m³。连同上游拉格朗德三级、四级和卡涅皮斯考河的几座大水库,总调节库容达 935 亿 m³,库容系数 β₂ 达 1.01,可进行多年调节。电站最大水头 142 m。库区移民和淹没损失很少。

枢纽布置 见图。主坝坐落在花岗岩基岩上,全长 2854 m。沿水库周边建副坝 30 座,共长 21 km。在主坝右侧建溢洪道,设 8 个溢流孔,孔口尺寸宽 20 m,高 12 m,用平面闸门控制,泄洪能力为 16280 m³/s。溢洪道泄槽长 1750 m,尾部用鼻坎挑流入河。

一期地下厂房位于主坝左侧,进水口有大量挖方,经过 16 条直径 8 m 的压力斜洞引水入地下厂房。主厂房洞室长 483.4 m,宽 26.5 m,高 47.3 m,埋深 120

m, 是当今世界上最大的地下厂房。厂房内安装 16 台水轮发电机组, 单机容量 333 MW。厂房的下游侧设尾水调压室, 长 451 m, 宽 22 m, 高 45 m。其后为 4 条尾水隧洞, 马蹄形断面, 宽 13.7 m, 高 19.8 m, 长 1220 m。二期地下厂房布置在一期地下厂房西 1 km 处, 主厂房长 221.5 m, 宽 25.3 m, 高 34.5 m, 安装 6 台同容量机组。



拉格朗德二级水电站平面布置图

1—主土石坝; 2—副坝; 3—岸边溢洪道; 4—一期地下厂房; 5—一期进水口; 6—一期尾水洞; 7—二期进水口; 8—二期尾水洞; 9—二期地下厂房; 10—开关站; 11—导流隧洞

机电设备 混流式水轮机, 一期和二期额定水头分别为 137.2 m 和 138.5 m, 转轮直径分别为 5.6/5.4 m 和 6.1 m, 转速分别为 133.3 r/min 和 150 r/min, 过流量 $270 \text{ m}^3/\text{s}$, 额定出力 338 MW。水轮机进口用圆筒阀控制, 直径 7.6 m。发电机额定容量 $370 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 功率因数 0.9, 频率 60 Hz, 电压 13.8 kV。一期地下厂房机组用电缆经 16 个直径 3.4 m 的电缆井引至地面变压器, 升压至 735 kV 特高压, 经开关站输出电力。二期地下厂房机组通过布置在地下的变压器升压至 315 kV, 然后经电缆井引至屋外开关站。

工程量 主坝土石填方 2300 万 m^3 , 副坝填方 2500 万 m^3 , 溢洪道进水口石方明挖 840 万 m^3 , 导流隧洞石方洞挖 86 万 m^3 , 一期地下厂房系统石方 280 万 m^3 , 二期地下厂房开挖覆盖层 72.9 万 m^3 , 石方 271.2 万 m^3 。

(陆钦佩)

lanwushan

拦污栅 (trash rack) 拦阻水流中有害污物进入进水口的设施。拦污栅多用于水电站进水口、船闸输水廊道进水口、抽水蓄能电站进/出水口。拦污栅一般由栅叶和栅槽组成。栅叶通常做成活动式, 必要时可提出清理或更换。栅槽固定在进水口结构内, 用以支持栅叶。栅叶在拦阻污物形成局部水压差, 将水压力传递

给栅槽和土建结构。

水电站水轮机进水口的拦污栅在立面上可分为垂直式和倾斜式两种布置。一般多用垂直式, 在平面上可布置成直线形、扇状多边形和环状多边形等型式。倾斜式只适用于低水头水电站的进水口, 平面上呈直线形, 倾斜角一般取 $60^\circ \sim 75^\circ$ 。

水流经过拦污栅, 产生水头损失。为了尽量减少水头损失, 过栅流速一般控制在 1 m/s 左右。设计中一般选取拦污栅前后水压差水头为 $2 \sim 4 \text{ m}$, 在污物较多时可选用 5 m 。按这样的压差设计栅叶的强度和刚度。如果水流中污物较多, 污物性质又易堵塞拦污栅, 则要考虑设置定期清理栅叶的设施和枢纽布置中采取导污、排污及拦污等多种措施, 以保护进水口不被堵塞, 保证水电站机组正常运行。

船闸输水廊道进水口的拦污栅, 过栅流速较大, 其设计水压差的取值一般较水电站进水口拦污栅为大。

抽水蓄能电站上、下池进/出水口的拦污栅, 运行在双向水流的条件下, 其结构强度及刚度要求均高于水轮机进水口拦污栅, 其设计水压差水头一般选取 5 m 或更大, 并要设法减小或消除栅叶与栅槽上、下游之间的间隙, 对栅叶构件要进行振动特性分析和稳定验算。

(沈德民)

Lancang Jiang shuixi shuneng ziyuan

澜沧江水系水能资源 (hydropower resources of Lancang river system) 据 1980 年《中华人民共和国水力资源普查成果》统计, 澜沧江水系中国境内理论蕴藏量为 3203 亿 $\text{kW} \cdot \text{h/a}$, 占中国的 5.4%; 可能开发资源 1263 亿 $\text{kW} \cdot \text{h/a}$, 占中国的 6.6%。澜沧江流域呈条带状, 支流短小, 干流长且落差大, 所以水能资源集中在干流, 其理论蕴藏量占全水系 (中国境内) 的 69.6%, 其中可能开发资源占 89.6%。

澜沧江发源于中国青藏高原唐古拉山北麓的青海省杂多县, 自西北向东南流, 经西藏流入云南, 在云南省境内的流向基本上为自北向南, 于西双版纳傣族自治州流出中国, 出中国后称湄公河, 又流经老挝、缅甸、泰国、柬埔寨、越南等国, 在越南胡志明市附近注入南海。流域面积 79.5 万 km^2 , 干流全长约 4500 km, 落差 5060 m, 平均年径流量 4750 亿 m^3 。中国境内澜沧江流域面积 16.74 万 km^2 , 干流河道长 2153 km, 落差 4583 m, 分别占总流域面积的 21%, 总河长的 47.8% 和总落差的 90.6%。中国边境处的平均年径流为 687 亿 m^3 。

澜沧江径流充沛、落差巨大, 水能资源丰富。支流

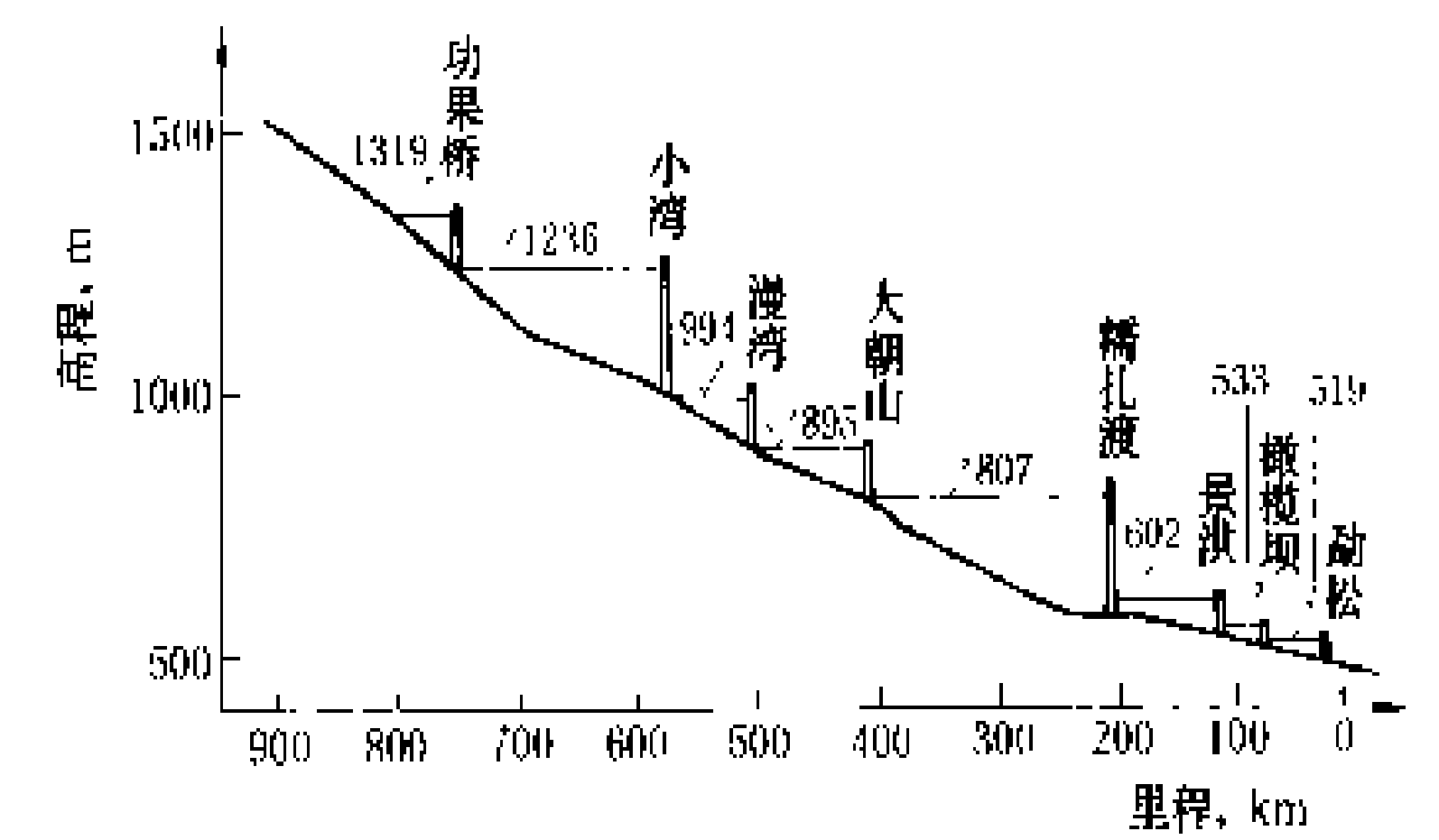


众多但相对短小，流域面积大于1万 km² 的支流仅3条，河长超过100 km 的仅13条。水能资源集中于干流，干流的理论蕴藏量2229 亿 kW·h/a，占中国境内部分的69.6%。

澜沧江水系可能开发资源的特点是集中于干流且大型水电站占很大比重。干流24座可能开发水电站总装机容量2088 万 kW，平均年发电量1133 亿 kW·h，分别占中国境内水系的89%。单站装机容量大于25 万 kW 的水电站共14座，装机容量2002 万 kW，平均年发电量1088.3 亿 kW·h，占中国境内水系的85%~86%，是西藏和云南的重要能源，也是中国重要水电基地之一。

(赵锐崑)

Lancang Jiang zhongxiayou shuidian guihua
澜沧江中下游水电规划 (hydropower development planning of the middle and lower reaches of Lancang river) 据1989年水利水电规划设计总院编制的《十二大水电基地》，澜沧江中下游布置有功果桥、小湾、漫湾、大朝山、糯扎渡、景洪、橄榄坝、勐松8级水电站。梯级水电站共利用水头928 m，总库容411.6 亿 m³，共装机14310 MW，平均年发电量合计为721.8 亿 kW·h。梯级布置见图。



澜沧江中下游梯级水电站布置图

澜沧江发源于中国青海省，流经西藏进入云南，然后流出中国入缅甸，改称湄公河。澜沧江在中国境内的流域面积为16.7 万 km²，河长2153 km，其中在云南省境内的河段长1227 km，河水面高程差1780 m。澜沧江国界处多年平均流量2180 m³/s。澜沧江由北向南流，纵跨13个纬度，流域呈条带状，地形复杂，地势起伏和气候差异很大。河道绝大部分为高山峡谷型，水能资源丰富，理论蕴藏量为2230 亿 kW·h/a (中国境内) (见水能资源)。曾规划整条澜沧江干流分14级开发，总装机22020 MW。昆明(水电)勘测设计院于1986年完成了《澜沧江中下游规划报告》，规划范围为功果桥以下的8级。报告提出的开发任务主要是发电，除供

电给云南省外，正研究向广东省等能源缺乏的沿海地区输电。8座水电站中：漫湾水电站已开始发电，大朝山水电站正在筹建，小湾和糯扎渡水电站正开展设计工作。

澜沧江中下游梯级水电站的特点有：①径流由雪水补给，水量丰沛而稳定，通过小湾水电站的多年平均流量为1220 m³/s，通过糯扎渡水电站的多年平均流量为1750 m³/s。②地质条件较好，水库淹没损失小，宜于建高坝大库、大型水电站，技术经济指标优越，可作为大规模能源输出基地。③供电质量高，年保证电量为平均年发电量的87.6%，且年内分配较均匀。④缺点是输电到中国沿海地区的距离较远，有的电站离区域构造断裂带较近，目前交通不便。

小湾水电站位于梯级的上游，有良好的调节性能，总库容152.7 亿 m³，可进行多年调节。除本身的装机容量4200 MW、平均年发电量187.8 亿 kW·h 外，对其下游各级电站的调节效益明显，如对漫湾水电站，使其保证出力增加1倍，年发电量增加16.5%。小湾水电站的淹没损失不大：耕地2327 ha，移民28700人。坝址区岩性为花岗片麻岩，坚硬完整，问题是距澜沧江断裂带较近，现正进一步查明对建高达300 m 高坝的影响。

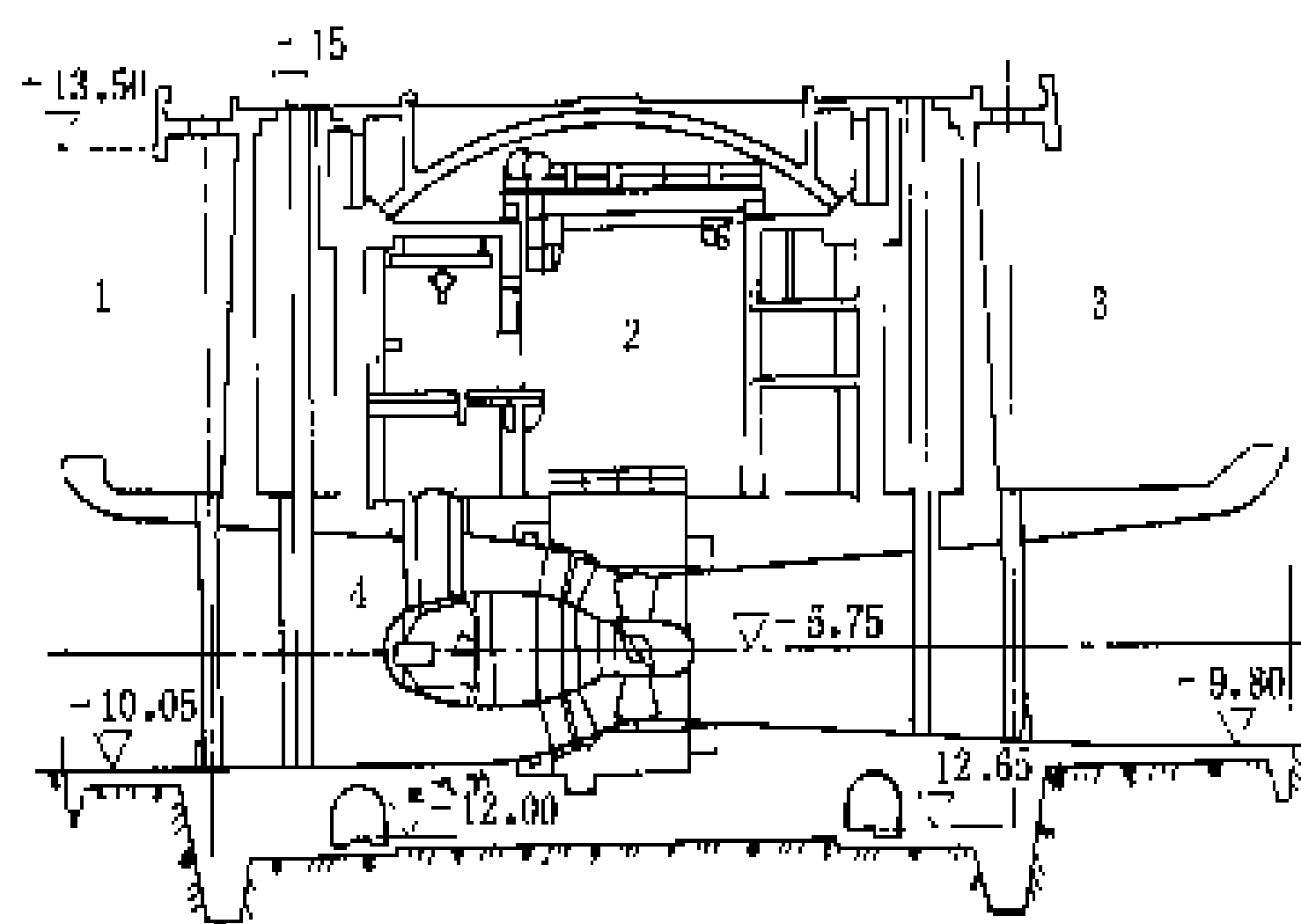
漫湾水电站的技术经济指标见漫湾水电站。糯扎渡是梯级中装机规模最大的水电站，装机4500 MW，平均年发电量231 亿 kW·h，并具有总库容达227 亿 m³ 的水库，供电质量高。

(欧阳华)

Langsi Chaoxi Dianzhan
朗斯潮汐电站 (Rance Tidal Power Station)

位于法国大西洋滨海圣马洛市 (St. Malo) 附近，装机容量240 MW，年发电量5.44 亿 kW·h，是当今世界最大潮汐电站。通过225 kV 输电线路接入法国电力系统。工程于1961年1月开工，1966年8月第一台机组发电，1967年12月竣工。至今20余年，机组磨损轻微，运行正常。大西洋通过英吉利海峡的潮汐，受到科当坦 (Cotentin) 半岛的阻碍而壅高，使朗斯河河口的平均潮差为8.45 m，最大潮差达13.5 m。在朗斯河口修建水库，当潮位13.5 m 时，水库回水长20 km，面积22 km²。潮位在13.5 m 与0 m 之间，调节库容为1.84 亿 m³。采用可逆式灯泡机组，在涨潮水库蓄水时和退潮水库放水时都可发电，还可在蓄水后期水位差较小时进行抽水，待水位差较大时利用这些存水发电。每天约有一半时间可发电。年发电量6.08 亿 kW·h，扣除抽水用电0.64 亿 kW·h，年净发电量5.44 亿 kW·h。(参见彩图插页第14页22图)

枢纽布置 坝址河宽 750 m, 河床最深处在零潮位以下 13 m, 基岩为花岗岩。建筑物自左至右依次为: 船闸, 净宽 13 m, 长 65 m; 电站厂房, 长 390 m, 宽 33 m, 高 25 m, 装有 24 台单机容量为 10 MW 的双向可逆式灯泡机组, 机组间距 13.3 m; 挡水堆石坝, 长 163.6 m, 高 25 m, 底宽 100 m; 泄水闸 6 孔, 每孔净宽 15 m, 高 10 m, 当水位为 5 m 时可通过流量 9600 m³/s。沿上述建筑物的顶部为双线 7 m 宽的公路。厂房剖面见图。



朗斯潮汐电站厂房剖面图

1 水库侧; 2 发电厂房; 3 海洋侧;
4—可逆式灯泡机组

双向可逆式灯泡机组 灯泡机组的转轮直径为 5.35 m, 4 个叶片。为防海水腐蚀, 12 台机组的叶片, 用不锈钢制成, 另 12 台机组的叶片用铝质青铜材料制成, 用特殊涂料涂覆, 并加阴极保护。额定水头 5.5 m, 额定转速 93.75 r/min。正向运行时水自水库流向大海, 水头 7~11 m 时可发电 10000 kW; 水头 3~5 m 时可发电 3200~8000 kW。反向运行, 水头 9~11 m 时可发电 10000 kW; 水头 3~5 m 时可发电 2000~5500 kW。抽水运行时, 动力 10000 kW, 水头 1~6 m 时可抽水 225~105 m³/s。当水位差很小时还可作正反向管道使用。机组共有正反向发电、抽水和过流等 6 种运行工况。同步电动机容量 10 MV·A, 功率因数 1.0, 飞逸转速 260 r/min, 电压 3.5 kV, 用变压器升压至 225 kV。

工程量和造价 工程共开挖土石方 40 万 m³, 填筑土石方 46 万 m³, 打设围堰钢板桩 1.3 万 t, 浇筑钢筋混凝土 35 万 m³。1960 年估计工程造价 4.8 亿法郎, 建成时造价为 5.7 亿法郎, 单位造价 2375 法郎/kW。

(陆钦侃)

Ledingdun Choushui Xu'nerg Dianzhan

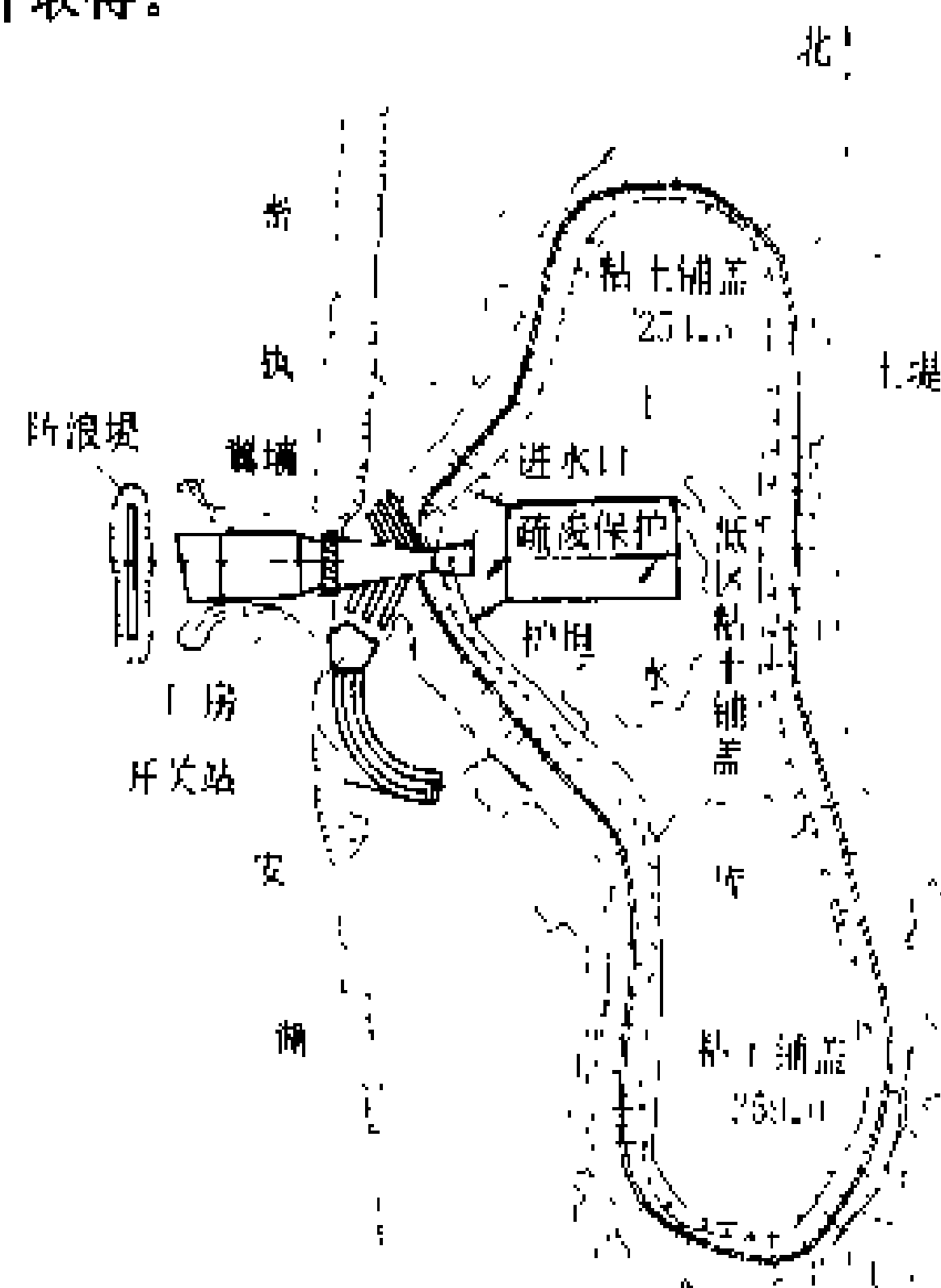
勒丁顿抽水蓄能电站 (Ludington Pumped Storage Power Project)

纯抽水蓄能电站, 位于美国东北部密执安湖东岸, 距勒丁顿市 9.4 km, 装

机容量 1872 MW。抽水年用电量 39.2 亿 kW·h, 年发电量 28.2 亿 kW·h, 总效率 72%。用 345 kV 输电线路接入密执安电力系统。工程于 1969 年 4 月开工, 1973 年 1 月第一台机组投运, 1974 年 1 月竣工。

上水库和下水库 上水库布置在离密执安湖不远的山顶上, 用土堤围成, 水库面积 3.4 km², 正常蓄水位 287 m, 相应库容 1.02 亿 m³, 消落深度 20 m, 调节库容 6660 万 m³, 可进行周调节。下水库利用天然的密执安湖, 平均湖水位 176.8 m。上下水库之间的净水头为 110 m。平面布置见图。

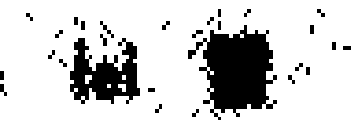
上水库围堤长 9.6 km, 堤顶高程 290 m, 最大堤高 52 m, 平均堤高 33 m, 内外边坡均为 1:2.5。填筑土方 2880 万 m³。堤基和库盘均为沙土层, 防止渗漏是上水库设计的重点。上堤的迎水面用沥青混凝土护面, 面积达 60 万 m², 护面下设碎石透水层, 并设潜水泵排水。库盘用粘土铺盖防渗, 厚 0.9~1.5 m。粘土从 10 km 外取得。



勒丁顿水库平面布置图

引水系统 进水口设护坦、翼墙, 并在上游 9 km 处设 1 道胸墙, 以控制旋涡和防止冰凌进入。进水闸 6 孔, 各宽 8 m, 高 8 m。工作闸门由 125 t 固定式启闭机控制, 可遥控操作。每孔进水闸接 1 条压力钢管, 向 1 台机组供水。压力钢管穿过土堤部分, 长 150 m, 外包混凝土。下接斜管段长 246 m, 埋在砂内。管径在顶部为 8.5 m, 至坡脚缩小为 7.3 m。管壁厚由 12.7 mm 增至 36.5 mm。6 条压力钢管共用钢材 12900 t。引水道长 396 m, 与利用水头之比为 3.6。

厂房 为露天式, 设在密执安湖畔, 长 176 m, 宽 52 m, 高 32 m。厂内安装 6 台可逆式混流机组。每个机组段长 25 m, 安装间长 18 m。厂房建筑大部分在地面以下。厂房顶高出平均湖水位 6.1 m, 顶上设起重量



为 340 t 的门式起重机,用于安装和检修时起吊机组部件。主变压器设在厂房后面,开关站位于厂房左侧。尾水管出口处装有拦污栅和工作闸门。尾水渠建有 2 条深入湖内的翼墙,长 500 m。离翼墙末端 340 m 处,还设有 1 道垂直于尾水渠的防浪堤。

可逆式机组 水泵水轮机的转轮直径 8.23 m,是世界上已有转轮最大的抽水蓄能机组。水泵水轮机的安装高程低于平均湖水位 8 m。水泵工况,抽水扬程 93~114 m,单机最大抽水量 315 m³/s,6 台机的抽水能力共达 1890 m³/s。发电工况,水头 87~108 m,水轮机额定出力 312 MW,最大出力 343 MW。发电电动机容量为 325~388 MV·A,转速 112.5 r/min,功率因数 0.85,电压 20 kV,频率 60 Hz。不抽水不发电时,可作同步调相机用。

工程量和投资 土石方开挖 543 万 m³,土石方填筑 2987 万 m³,混凝土浇筑 40 万 m³。总造价包括施工期利息等间接费用共 3.09 亿美元,单位投资 165 美元/kW (1974 年价格)。

(陆钦侃)

leiguan

雷管 (detonator) 引爆炸药的爆破器材。雷管内装的起爆药是对一般冲击如打击、加热具有很高敏感度的炸药。爆炸时,能产生起爆冲能而引爆其它炸药爆炸。19 世纪 60 年代瑞典化学家 A. B. 诺贝尔 (A. B. Nobel) 发现硝化甘油能用雷汞引爆,雷汞即广泛地用于雷管生产,因最初管内仅装雷汞,故名雷管。

工业雷管是用金属、纸或塑料制成的小管,由管壳、正、副起爆药及加强帽构成。副起爆药压装在雷管底部,起爆炸作用。正起爆药压装在副起爆药上面,起诱爆副起爆药作用。顶部用铜制加强帽压盖住,加强帽中心开有 2 mm 小圆孔,起提高压装高敏感度起爆药的安全性,降低雷管使用时的危险性,并在一定程度上保护起爆药不受潮,提高爆炸威力。雷管底部加工成球形或锥形窝穴,起雷管爆炸波的聚能作用。

工业雷管的品种繁多,按引爆方式有火雷管和电雷管。电雷管按点燃到爆炸作用时间的差别有瞬发电雷管和延期电雷管 (包括毫秒延期电雷管和秒延期电雷管)。延期电雷管由延期剂控制区分段号,段号越大,则延期时间越长。此外,还有用于爆破现场有杂散电流、静电和雷电危险的抗杂散电流、抗静电的雷管。用于有瓦斯、矿尘爆炸危险的安全雷管等其它专用的工业雷管。

火雷管 用导火索的火焰冲能引爆的雷管,其构造如图 1。各国所产标准的 6 号或 8 号火雷管,外壳用

铜、铝、铁、复铜、纸、塑料等材料制成,一端开口以插入导火索,导火索的火焰通过加强帽小孔传入正起爆药起爆。

电雷管 构造与火雷管基本相同,如图 2。只是在管壳开口段有一个用高电阻金属桥丝和脚线组成的电激发点装置,点火装置型式通常有:金属桥丝炽热式、导电引燃药炽热式和火花式三种。①金属桥丝炽热式是由联接在脚线上的金属桥丝和引火头组成,通电后桥丝引燃引火头放出火花引爆雷管。②导电引燃药炽热式是由两个电极和导电的

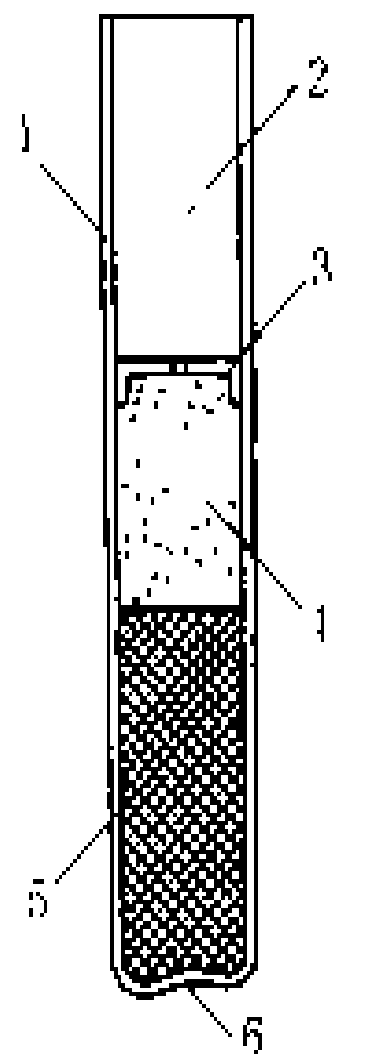


图 1 火雷管剖面示意

- 1—管壳; 2 空
- 后桥丝引燃引火头放
- 出火花引爆雷管。②
- 导电引燃药炽热式
- 由两个电极和导电的
- 6—聚能窝穴

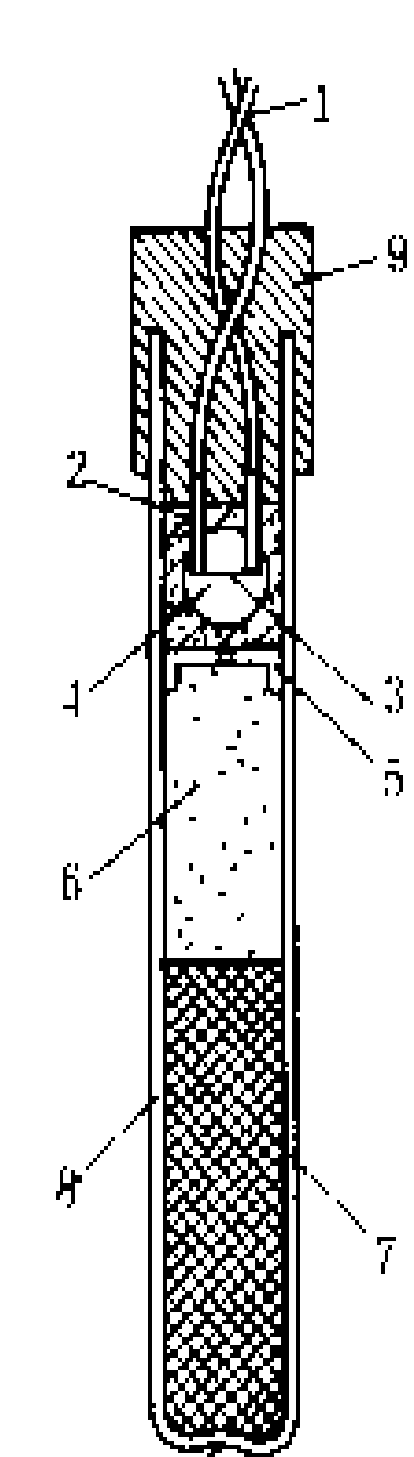


图 2 电雷管剖面示意

- 1 脚线; 2—叉
- 头; 3—桥丝;
- 4—引火头; 5
- 加强帽; 6 正
- 起爆药; 7—副
- 起爆药; 8—管
- 壳; 9 封口;
- 10 聚能窝穴

引燃药组成,通电后电阻瞬间下降,引火头燃烧引爆雷管。③火花式是由两个电极和不导电的引火头组成,通电后产生电火花引爆雷管。由于桥丝炽热式电点火装置使用比较安全,各国均广泛应用。电桥丝用康铜、铬镍或铂铱等合金制作。引燃剂常用引火棉或硫氰酸铅、氯酸钾及粘合剂胶制,点火装置用密封胶及塑料或硫磺固定封口,其外再加防潮涂料。电雷管的脚线一般为铜或镀锡铁丝,长 0.75~2.5 m 不等。

延期电雷管 在电气点火装置与正起爆药之间增加一段延期装置,其延期时间用不同颜色的脚线识别。秒延期电雷管延期时间用缓燃导火索控制;毫秒延期电雷管的延期时间由缓燃剂决定。缓燃剂有铅丹与硅、铅丹与铬硅铁等混合物,延缓时间长短由所装填缓燃剂性质、用量而异。

(王守道)

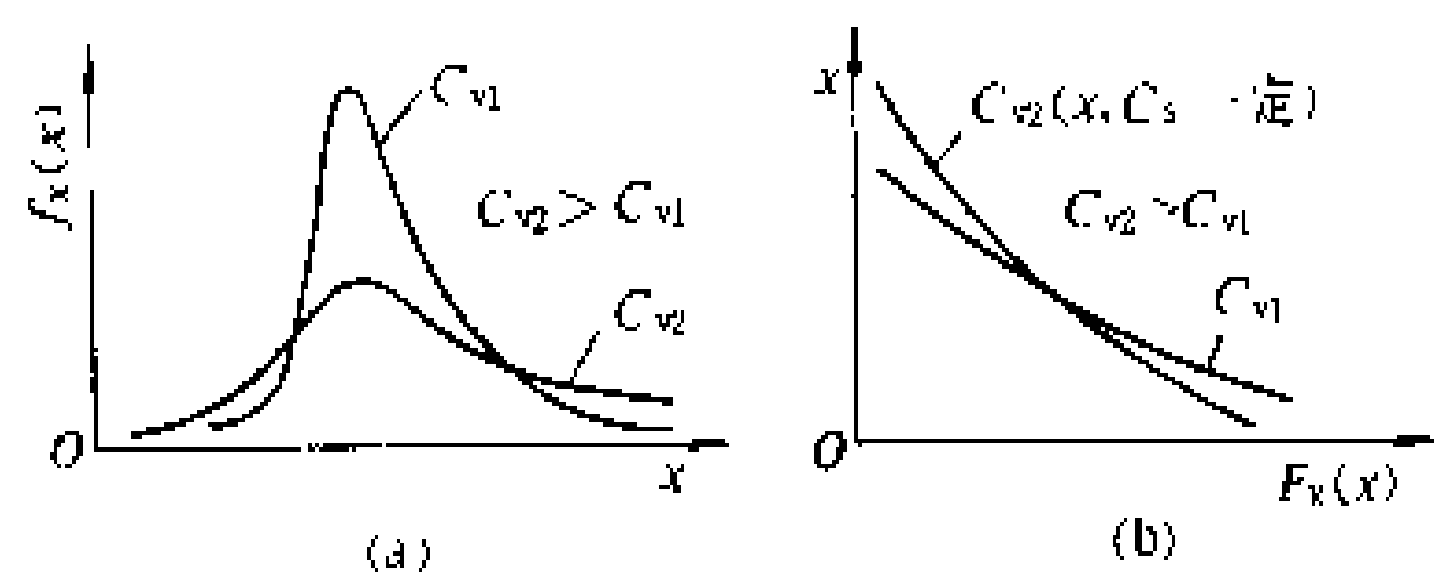
lichaxishu

离差系数 (coefficient of variation) 表示变量概率分布函数离散程度的指标。也称变差系数,代表符号为 C_v ,计算公式为

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{1}{\bar{x}} \left[\int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 f_x(x) dx \right]^{1/2}$$

式中 C_v 为概率分布的标准差 σ 与均值 \bar{x} 之比值。 C_v 值较大,则系列的离散程度较大,即系列中各项的值同

均值相差较大; C_v 值较小,则系列的离散程度较小,即系列各项的值同均值相差较小。 C_v 值对概率密度函数 $f_x(x)$ 及概率分布函数 $F_x(x)$ 的影响见图。



C_v 对密度曲线和分布曲线的影响

(a) C_v 对密度曲线的影响; (b) C_v 对分布曲线的影响

水文系列的 C_v 值的大小与气候、流域集水面积及河流补给状况有关。中国的雨量和径流的 C_v 值的分布,大致是南方小北方大,沿海小内陆大,年雨量的 C_v 值一般在0.15~0.7之间,年径流的 C_v 值一般在0.2~1.0之间,个别地区也有超过1.0以上的,一般随流域面积增加而减少。洪水 C_v 值在0.21~1.90之间,一般随历时而递减。

(林益冬)

Lijiaxia Shuidianzhan

李家峡水电站 (Lijiaxia Hydropower Station)

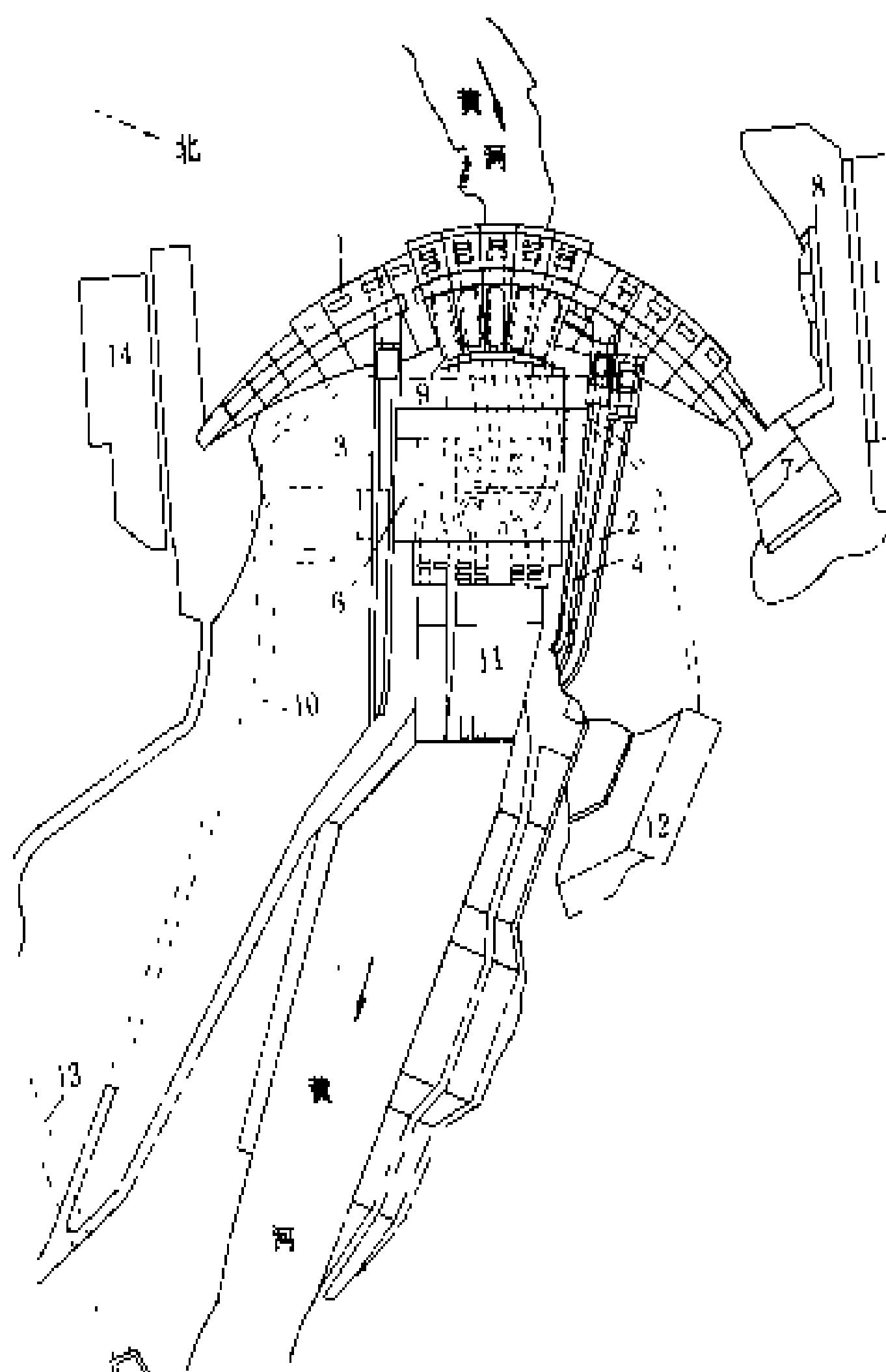
位于黄河干流上游青海省尖扎县和化隆县交界处,距西宁市直线距离55 km,至兰青铁路平安驿站78 km,以发电为主,兼有灌溉效益。装机容量2000 MW,保证出力581 MW,年发电量59亿kW·h,以5回330 kV输电线路接入西北电力系统,供电给青海、甘肃、陕西、宁夏4省区。主坝为混凝土双曲拱坝,最大坝高165 m。水库淹没耕地5039亩,迁移人口3196人。工程于1987年7月开工,计划1996年发电、1999年竣工。

水文和水库特性 坝址以上流域面积13.67万 km^2 ,多年平均流量664 m^3/s ,多年平均年径流量209.4亿 m^3 。采用千年一遇洪水设计,万年一遇洪水校核。经龙羊峡水库调节后,千年一遇洪水流量4940 m^3/s ,相应库水位2181.3 m;万年一遇洪水流量7220 m^3/s ,相应库水位2182.6 m,总库容17.5亿 m^3 。正常蓄水位2180 m,相应库容16.5亿 m^3 ,死水位2178 m,调节库容0.6亿 m^3 ,具有日调节性能。电站设计水头122 m,最大水头135.6 m,最小水头114.5 m。

坝址地形地质 坝址地震基本烈度为7度,主要水工建筑物按8度设防。坝址位于李家峡峡谷中部,为“V”形河谷,两岸基本对称。左坝肩由于下游冲沟切割,山体单薄,呈三面临空状态。右岸山体较厚。坝址基岩由混合岩、片岩相间组成,并有花岗伟晶岩脉穿插其间,变质岩岩层倾向上游偏右岸,倾角 $40^\circ\sim 50^\circ$ 。新

鲜基岩质地坚硬,完整性较好。坝址区扭性、扭张性高倾角的顺河向断层较为发育。坝址右岸上游有1号切层滑坡,左岸上游有2号顺层滑坡,均为大型滑坡体。对1号滑坡考虑采用上部开挖卸荷和利用弃碴填压坡脚的措施处理。2号滑坡体顺河分布较长,考虑在部分地段采用上部开挖卸荷的处理措施,以提高施工期滑坡体的稳定性。

枢纽布置 枢纽由混凝土双曲拱坝、泄水建筑物、引水发电建筑物及左右岸灌溉渠首等建筑物组成,见图。

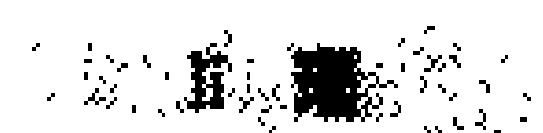


李家峡水电站枢纽平面布置图

- 1—拱坝; 2—左中孔; 3—右中孔; 4—左底孔; 5—主厂房; 6—安装间; 7—重力墩; 8—左岸副坝; 9—坝后背管; 10—进厂交通洞; 11—尾水渠; 12—出线站; 13—导流洞; 14—缆机平台

混凝土双曲拱坝坝顶全长414.4 m,坝顶高程2185 m,最大底宽(厚)45 m。左岸2157 m高程以上设有重力墩。左右岸各设1条中孔泄水道,弧门孔口尺寸均为8 m×10 m,进口底坎高程2120 m,泄槽最大流速40 m/s,设计泄流量2190 m^3/s ,校核泄流量2210 m^3/s 。左岸设1条底孔泄水道,弧门孔口尺寸5 m×7 m,进口底坎高程2100 m,设计泄流量1110 m^3/s ,校核泄流量1120 m^3/s 。中、底孔泄水道均采用窄缝式挑流鼻坎。

主厂房设置5台容量为400 MW的混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径6.15 m,转速125 r/min。5台机组双排布置在坝后式厂房内,前排2台机组,后排



3 台机组。安装间布置于厂房右侧。5 台 450 MV · A 330 kV 三相组合式变压器、330 kV 气体绝缘金属封闭电器和副厂房均布置在厂坝间。坝后厂房内每台机组的引水钢管内径 8 m，进口底坎高程 2130 m，采用坝后背管布置方式。

左右岸灌溉渠道进水口均设于坝体，进口底坎高程 2170 m，设计引水流量分别为 5m³/s 及 3m³/s。

工程施工 采用河床一次断流，右岸隧洞导流，基坑全年施工的导流方式。导流标准按龙羊峡水库调节后二十年一遇洪水设计。施工对外交通采用公路运输。主体工程土石方开挖 328 万 m³，土石方填筑 17.5 万 m³，混凝土浇筑 254 万 m³，钢筋、钢材及金属结构约 8.8 万 t。

设计和建设单位 西北勘测设计院设计，业主为西北电业管理局。

(潘长龄)

lilun lixue

理论力学 (theoretical mechanics) 研究物体机械运动一般规律的力学分支学科。理论力学包括静力学、运动学和动力学 3 部分。物体的相对位置随时间变化称为机械运动，其变化量称为位移，位移对时间的变化率称为速度。理论力学的研究对象只限于速度远远小于光速的宏观物体，并根据不同情况抽象为质点(只有位置，没有大小，但具有质量)、质点系或刚体(特殊的质点系，各质点之间距离不变)。理论力学是天体力学、流体力学、结构力学和材料力学等学科的基础，在科学研究和生产实践中占有重要地位。

力 物体间的相互作用，是引起物体运动状态变化的原因。物体的质量 m 与其运动速度 v 的乘积称为动量。动量对时间的变化率 dt 与所受的力 F 成正比。选取质量、长度、时间和力的单位分别为 kg，m，s 和 N，则有 $F = d(mv)/dt$ ，这就是 I. 牛顿(I. Newton)第二定律。它与惯性定律、作用与反作用定律、力的合成中的平行四边形法则、刚化原理、二力平衡原理、增减平衡力系公理和万有引力定律等构成理论力学的研究依据。

静力学 研究物体的静止和力系平衡的规律。任何平衡和静止都是相对的，通常取地球为参照体，相对于地球为静止的状态称为静止状态。在一个静止物体上施加一个力系后，此物体仍保持静止，则称此力系为平衡力系。一个力系是平衡力系的充分必要条件是力系的主向量和主矩均为零。在研究杆件的截面内力和流体平衡等问题时，经常要用到静力学。(见材料力学)

运动学 只分析物体如何运动，并确定合适的方法去描述运动，而不考虑运动状态变化的原因。研究质点的运动时，内容有参考系、运动方程、速度、加速度和轨迹等，不考虑质点的自身旋转。研究刚体运动时，内容有平动、转动、复合运动和瞬时转动中心等。运动学对于复杂机械的设计和研究非常有用。

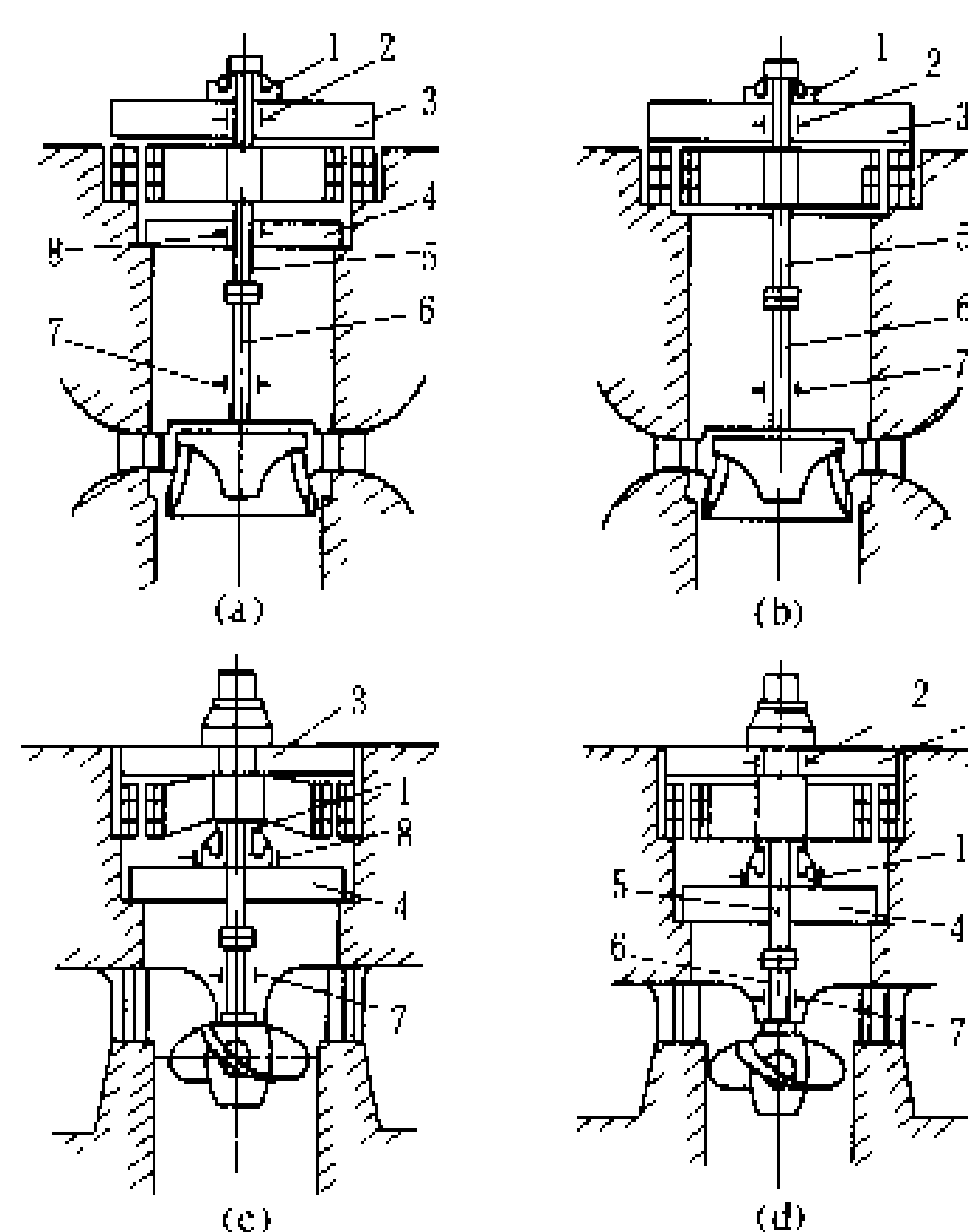
动力学 以牛顿定律和万有引力定律为基础来研究物体机械运动状态变化的规律。由已知运动状态求所加的力系，或由所加的力系求运动状态的变化，涉及质点动力学、质点系动力学和刚体动力学。它应用由牛顿定律推导出来的动量定理、动量矩定理和能量守恒定理求解各种工程实践中的问题，应用于卫星轨道研究、弹道学、振动学和陀螺仪研制等方面，也用于研究水电站的抗震和发电机组的振动问题。

(范元勋)

lishi shuilun fadianji

立式水轮发电机 (vertical hydro-generator)

转轴垂直布置的水轮发电机。具有定子机座结构简单、占地面积小、垂直高度大等特点。按照轴系布置位置，立式水轮发电机可分为悬式和伞式两类，见图。



立式水轮发电机组结构型式

(a) 悬式带下机架；(b) 悬式不带下机架；(c) 全伞式；
(d) 半伞式

1—发电机推力轴承；2 发电机上导轴承；3—发电机上机架；4—发电机下机架；5—发电机转轴；6—水轮机主轴；7—水轮机导轴承；8 发电机下导轴承

悬式水轮发电机 推力轴承位于转于上部的水轮发电机。推力轴承布置在上机架的中心体内或上机架上部，全部转动部分重量及水推力通过上机架支臂传

到定子机座或风洞周围混凝土基础上，因此下机架可采用轻型结构，甚至可以取消。悬式水轮发电机的优点是径向机械稳定性较好，维护检修方便，多用于中、高速机组。图（a）为带下机架的悬式水轮发电机，图（b）为不带下机架的悬式水轮发电机。

伞式水轮发电机 推力轴承位于转子下部的水轮发电机。推力轴承可以布置在下机架的中心体内或下机架上部，也可布置在水轮机顶盖上。按导轴承设置位置，伞式水轮发电机又可分为全伞式和半伞式两种：推力轴承以上部位无导轴承的为全伞式水轮发电机，见图（c）；上部有导轴承的为半伞式水轮发电机，见图（d）。伞式机组的优点是结构紧凑，总高度比悬式低，因而可以降低厂房高度。伞式机组还可以减轻上机架的重量，不拆卸推力轴承即可吊出转子，多用于中、低速大容量机组。

大容量立式水轮发电机的主要技术参数 水轮发电机的结构型式与机组制造水平、机组技术经济指标、机组运行稳定性以及检修维护方便等因素有关，主要视定子铁芯内径（ D_1 ）与定子铁芯高度（ L_1 ）和机组额

定转速（ n_n ）乘积的比值而定。

一般

$$\frac{D_1}{L_1 n_n} \leq 0.035$$

采用悬式

$$\frac{D_1}{L_1 n_n} > 0.035$$

采用伞式

$$\frac{D_1}{L_1 n_n} > 0.05$$

采用全伞式

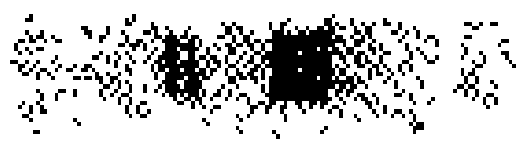
近年来，由于结构上采取措施，提高伞式机组结构的稳定性和便于维护、检修，使伞式机组扩大应用到大容量、高转速机组，以提高经济性。

中国已设计、制造单机额定容量最大的悬式水轮发电机为 343 MV·A，装在白山水电站；单机额定容量最大的半伞式水轮发电机为 355.6 MV·A，装在龙羊峡水电站；定子外径达 20 m，单机额定容量为 194.2 MV·A，水轮发电机转动惯量达 172000 t·m²，转子重达 792 t 的半伞式水轮发电机，装在葛洲坝大江电站，这是中国结构尺寸最大的立式水轮发电机。

表中为部分大容量立式水轮发电机的主要技术数据。

部分大容量立式水轮发电机的主要技术数据

电 站 名 称	伊 泰 普	伊 泰 普	大 古 力	萨 扬 - 舒 斯 克	古 里	大 古 力	克 拉 斯 诺 雅 尔 斯 克	邱 吉 尔 瀑 布	列 维 尔 斯 托 克	卡 博 拉 巴 萨	龙 羊 峡	白 山	刘 家 峡	葛 洲 坝
国 别	巴 西 巴 拉 圭	巴 西 巴 拉 圭	美 国	苏 联	委 内 瑞 拉	美 国	苏 联	加 拿 大	加 拿 大	莫 桑 比 克	中 国	中 国	中 国	中 国
额定容量 (MV·A)	824	737	718	711	700	615	588	500	485	480	355.6	343	343	194.2
结构型式	半伞	半伞	半伞	全伞	半伞	半伞	全伞	半伞	全伞	全伞	半伞	悬	半伞	半伞
额定电压 (kV)	18	18	15	15.75	18	15	15.75	15	16	16	15.75	18	18	13.8
额定功率 因 数	0.85	0.95	0.975	0.9	0.9	0.975	0.85	0.95	0.95	0.85	0.9	0.875	0.875	0.875
额定转速 (r/min)	90.9	92.3	85.7	142.8	112.5	72	93.8	200	112.5	107.1	125	125	125	54.6
飞逸转速 (r/min)	170	170	158	280	215	144	180	305/335	230	212	256	260	250	120
短路比	1.18	1.18	1.35	0.67	1.1	1.21					1.122	1.114	0.84	1.3
转动惯量 (t·m ²)	328000	320000	356000	102000	155000	429000	187600	33500	129000	100000	85000	70000	53000	172000
推力负荷 (9.8 kN)	4060	4060	4700	3250	2667	4040	2600	1700	2060	2150	2270	1800	1575	3800
定子铁芯 内径(m)	16	16	18.79	11.85	13.65	18.32	16.10	9.20	13.60	13	12	11.34	11.91	16.99



续表

电 站 名 称	伊 泰 普	伊 泰 普	大 古 力	萨 扬 - 舒 申 克	古 里	大 古 力	克 拉 斯 诺 雅 尔 斯 克	邱 吉 尔 瀑 布	列 维 尔 斯 托 克	卡 博 拉 巴 萨	龙 羊 峡	白 山	刘 家 峡	葛 洲 坝
国 别	巴 西 巴 拉 圭	巴 西 巴 拉 圭	美 国	苏 联	委 内 拉	美 国	苏 联	加 拿 大	加 拿 大	莫 桑 比 克	中 国	中 国	中 国	中 国
定 子 铁 芯 高 度 (m)	3.50	3.26	2.13	2.75	3.80	3.48	1.75		3.13	3.27	2.55	2.75	1.60	2.00
重 量 (t)	3548	3381	2500	1860	2440	3510	1640	1090	1800		1565	1480	1296	1635
效 率 (%)	98.6	98.6	98.6	98.3	98.69	98.37	98.25	95	98.5		98.3	98.4	97.46	97.5
冷 却 方 式	定 子 水 冷、转 子 空 冷	定 子 水 冷、转 子 空 冷	定 子 水 冷、转 子 空 冷	定 子 水 冷、转 子 空 冷	空 气 冷 却	空 气 冷 却	定 子 水 冷、转 子 空 冷	空 气 冷 却	空 气 冷 却	空 气 冷 却	空 气 冷 却	空 气 冷 却	定 子 水 冷、转 子 空 冷	空 气 冷 却

注：制造厂给出的推力负荷单位为 tf，现换算成 kN。

(邱景安)

liqing hunningtu shigong

沥青混凝土施工 (bitumen concrete construction) 将粗、细骨料、填料和沥青等按比例配制,加热拌和后压实建成防渗体的施工工艺。沥青混凝土具有良好的可塑性、柔性、不透水性和耐久性,产生裂纹时尚有自行愈合的性能,除道路路面等工程外,常用作水工建筑物的防渗体。

制备沥青混凝土的原材料有:①沥青。主要起胶凝作用,具有良好的抗水性,从来源上分焦油沥青(煤沥青)和石油沥青两大类,水工沥青混凝土一般使用石油沥青。②骨料。主要起骨架作用。中国 SD220-87《七石坝碾压式沥青混凝土防渗墙施工规范》规定,对有防渗要求的水工沥青混凝土粗骨料粒径不超过铺筑层压实厚度的 1/3,且不大于 25 mm,可用碱性岩石制备的碎石。当用酸性岩石时,则需掺用消石灰或水泥以改善与沥青的粘附性能。细骨料粒径在 2.5 mm 以下,可用河砂、山砂、人工砂和加工碎石筛余的石屑。③填料。是沥青混凝土的填充物。通常用石灰岩或白云岩的岩粉,也可采用水泥、滑石粉等矿粉。④掺料。为改善沥青混凝土的性能,根据不同要求可加入不同材料,如:掺入石棉可以提高斜坡稳定和弯曲强度;掺入氧化钙含量大于 65%的消石灰或水泥可以提高水稳定性;掺入橡胶、塑料或其他高分子材料可提高机械强度和变形能力等。

沥青混合料采用重量配比。沥青用量与沥青混凝土性能有密切关系,一般可参照水工水泥混凝土的最

大密度法求出沥青混合料的级配后,以此为 100%,再通过拌和压实试验选择最佳沥青掺配量。沥青混合料采用专用的自动拌和楼拌制或内热式加热滚筒预热骨料和强制式热拌和机拌制。出机温度要达到在经过运输、摊铺等热量损失后仍能满足起始碾压温度的要求,一般用振动碾压实。

水工沥青混凝土多用于水工建筑物的防渗结构,用作上石坝防渗体时有面板和心墙两种型式。沥青混凝土面板堆石坝最早是 1934 年德国的阿梅克坝(Amecke)(坝高 12 m)。1937 年阿尔及利亚修建格立勃坝(Ghrib)(坝高 65 m),经 1954 年国际鉴定运行 18 年后良好,各国才予重视,所以大部分水工沥青混凝土建筑物都是在 20 世纪 50 年代以后修建的。

(王守道)

liangongba

连拱坝 (multiple arch dam) 具有拱形面板的支墩坝。拱形面板具有向上游倾斜的坝坡,坡度 40°~60°。拱中心角在 90°~180°之间。连拱坝的特点:①利用拱的结构作用,拱形面板基本受压,故它的跨度大,截面薄,并可视地形情况采用不同跨度,如丹尼尔·约翰逊(Daniel Johnson)连拱坝中央跨度 162 m,两侧为 76.2 m。当跨度在 10~20 m 左右时,拱及支墩厚度常在 0.5~2.0 m 左右,需配置钢筋。当跨度增至近 50 m 或更大时,它们的厚度可增至 5~10 m,甚至 10 m 以上,这时一般可不配置钢筋。②由于支墩间跨度

大,支墩的厚度也就相应加大,故支墩具有一定的侧向刚度,且支墩之间由具有一定柔性的拱形面板相连,一般可不增设支墩间的支撑。③拱形面板系超静定结构,设计中需考虑温度变化的影响,其影响随着拱的厚度加大及拱的中心角的减小而增加。

连拱坝坝型在支墩坝中间世较早,发展较快。1917年美国修建了豪杰湖(Lake Hodges)连拱坝,坝高41.5 m。中国在1954年和1956年相继在安徽省建成了佛子岭和梅山连拱坝,坝高分别为74.4 m和88.2 m,前者是中国设计建设的第一座高坝,后者是当时世界上最高的连拱坝。中国利用传统的砌石工艺,建成很多中小连拱坝,其中主要的有四川省的丰岩浆和河北省的野沟门砌石连拱坝,分别高60 m和45 m。1968年在加拿大建成的丹尼尔·约翰逊(Daniel Johnson)连拱坝,坝高214 m,是世界上连拱坝中

(也是支墩坝中)最高的,最大跨度162 m,拱厚3~22.8 m,支墩厚14 m。近年来连拱的跨度、厚度有逐渐增加的趋势。这样可节省钢筋,减少施工模板,有利于施工机械化,且对坝的抗渗耐久性及对抵抗意外荷载的超载能力都是有利的。

(曹楚生)

Liao He shuixi shuinneng ziyuan
辽河水系水能资源 (hydropower resources of Liaohe river system) 辽河干支流天然条件下蕴有的能量(理论蕴藏量)。据1980年《中华人民共和国水力资源普查成果》统计,辽河水系理论蕴藏量82.8亿kW·h/a,其中可能开发资源量(见水能资源)为6.45亿kW·h/a。可能开发的水电站都为中小型,而且集中在支流太子河和浑江,分布见表。

辽河水系水能资源分布表

河流名称	流域面积 (km ²)	多年平均 流量 (m ³ /s)	河道长度 (km)	水面落差 (m)	利用水头 (m)	理论蕴藏量 (亿 kW·h/a)	可能开发资源		
							电站 座数	装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kW·h)
水系合计						82.8	52	247.4	6.45
其中:									
辽河干流	231736	378	1390	1200	66.4	27.1	3	17.7	0.67
支流:西拉木伦河	31866	30	386		278.4	12.3	10	30.9	0.92
东辽河	11306	26.5	448	291	46.1	2.6	13	17.9	0.27
浑 河	11481	93	415	588	155.2	12.2	9	57.3	1.36
太子河	13883	106	413	463	186	14.0	8	104.0	2.77
其他支流						14.6	9	19.6	0.46

辽河干流发源于河北省七老图山脉,流经内蒙古、吉林、辽宁4省(区),于盘山注入渤海。干流全长1390 km,水面落差1200 m,河口处多年平均流量378 m³/s。干流上游称老哈河,支流西拉木伦河汇入后称西辽河,东辽河汇入后始称辽河。全水系的理论蕴藏量中约30%分布在干流,约50%分布在支流西拉木伦河、浑河和太子河,另20%分布在其他支流。辽河水系的主要开发任务是防洪和供水,径流量较少,水能资源开发利用条件不理想。可能开发的52座水电站中,仅5座电站的装机容量大于10 MW,没有超过50 MW的,合计装机容量仅247.4 MW。资源开发条件相对较好的是支流太子河、浑河和西拉木伦河。

(曹学敏)

liexi

裂隙 (fissure) 见节理。

Liujiaxia Shuidianzhan

刘家峡水电站 (Liujiaxia Hydropower Sta-

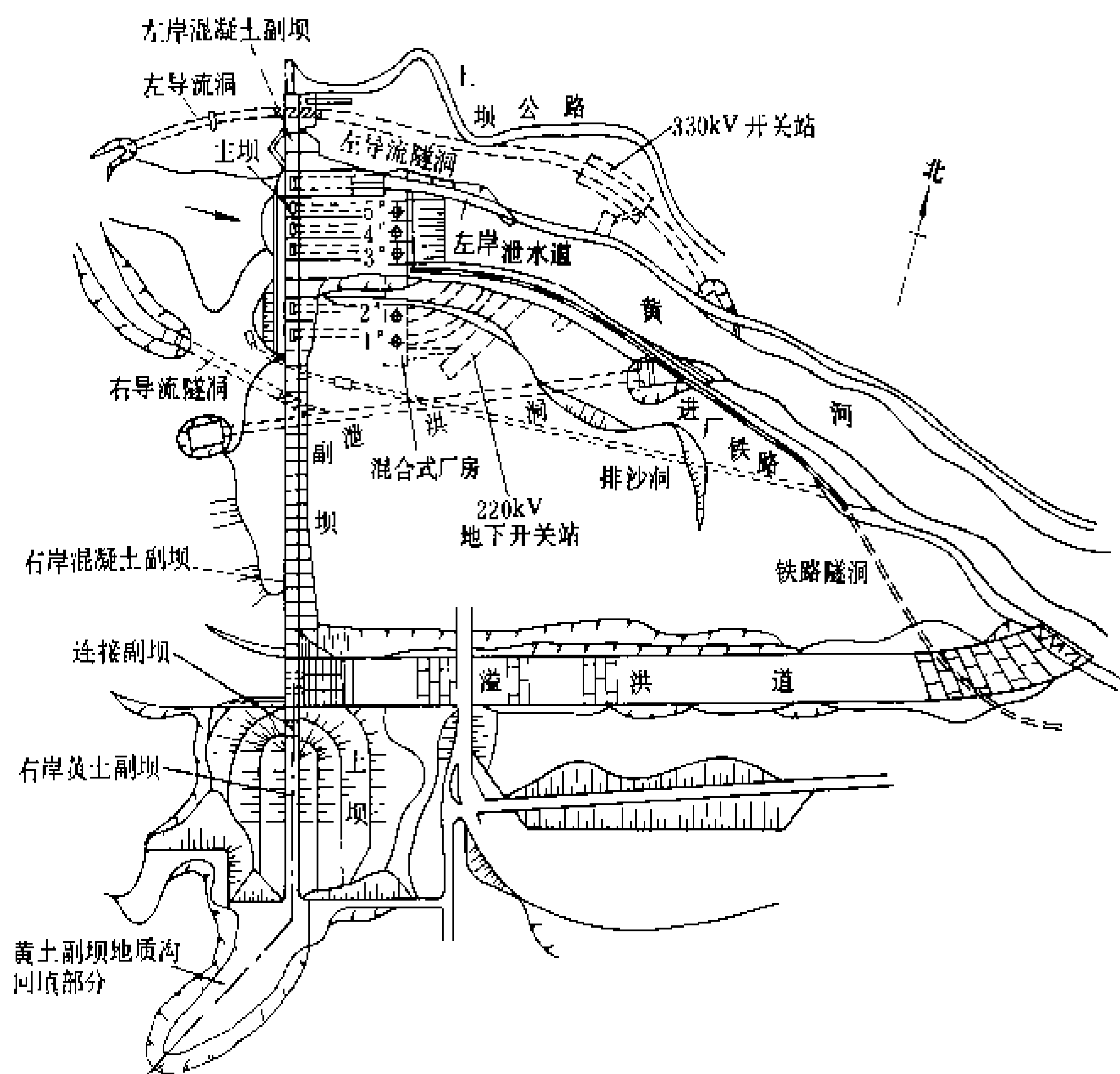
tion) 中国建成的第一座容量超过百万千瓦的大型水电站。位于黄河上游干流,甘肃省永靖县境内,距兰州市100 km。电站以发电为主,兼有防洪、灌溉、供水、防凌等综合利用效益。装机容量1225 MW,保证出力557 MW,多年平均年发电量55.8亿kW·h,以330 kV和220 kV电压接入西北电力系统,供电给陕西、甘肃、青海、宁夏。主坝为整体式混凝土重力坝,最大坝高147 m。工程于1958年开工,1961年停建,1964年复工,1969年3月第一台机组发电,1974年竣工。(参见彩图插页第13页21图)

水文和水库特性 坝址以上流域面积181766 km²,多年平均年径流量273亿m³,多年平均流量867 m³/s。水库正常蓄水位1735 m,死水位1694 m。总库容61.2亿m³。校核洪水位至汛期限制水位的防洪库容14.75亿km³,正常蓄水位至死水位的调节库容41.5亿m³。死库容15.5亿m³。为不完全年调节水库。主副坝设计洪水标准为:千年一遇洪水设计,万年一遇洪水校核。在不计龙羊峡水库调蓄时,设计洪水流量8860 m³/s,水位1735 m;校核洪水流量10600 m³/s,



水位 1738 m。年平均输沙量 8940 万 t，实测最大含沙量 310 kg/m^3 。电站最大水头 114 m，设计水头 100 m，最小水头 70 m。

枢纽布置 主坝为混凝土整体式重力坝，坝顶高程 1739 m，坝顶长 204 m，设有坝后混合式厂房和左岸泄水道。其左为左岸混凝土重力副坝，长 51 m。其右为右岸混凝土重力副坝，长 300 m。再右为右岸溢洪道，长 48 m。右接连接副坝和右岸黄土副坝，分别长 47 m 和 143.25 m。黄土副坝地质沟回填部分轴线长 205 m。主副坝坝轴线总计长 998.25 m。若不计地质沟回填部分，坝轴线总长为 793.25 m。见图。



刘家峡水电站枢纽布置图

混合式厂房内装有 5 台机组，3 台布置在坝后，2 台布置在窑洞内。窑洞部分和坝后部分中间设安装场连接。5 台机组均是竖轴混流式水轮发电机组。单机容量：1、2、4 号机组为 225 MW；3 号机组为 250 MW；5 号机组为 300 MW。额定转速均为 125 r/min。水轮机转轮直径均为 5.5 m。发电机：1~4 号为悬式空冷型，额定电压 15.75 kV，额定功率因数 0.875，定子铁芯内径 12.6 m。5 号机为半伞式双水内冷型，额定电压 18 kV，定子铁芯内径亦为 12.6 m。发电机电压侧采用发电机—变压器单元接线，220 kV 侧采用双连四角形接线，330 kV 侧采用三角形接线。330 kV 和 220 kV 两级电压间设有 1 台 360 MV·A 自耦联络变

压器。1、2 号机组的主变压器布置在主厂房下游窑洞内；3、4、5 号机组的主变压器和自耦变压器均布置在坝后厂房上游厂坝间。330 kV 和 220 kV 高压开关站分别布置在左岸地下和右岸地下。变压器与开关站用高压充油电缆连接。

泄洪设施 右岸溢洪道，全长 872.8 m，首部设有胸墙式溢洪孔 3 孔，孔口宽 10 m，高 8.5 m，堰顶高程 1715 m，设计最大泄流量 $3785 \text{ m}^3/\text{s}$ 。左岸设 2 孔泄水道，渠道长 241 m，孔口宽 3 m，高 8 m。进口底坎高程 1665 m，设计最大泄流量 $1488 \text{ m}^3/\text{s}$ 。泄洪隧洞 1 条，位于厂房和右岸溢洪道间，长 529 m。孔口宽 8 m，

高 9.5 m。洞身宽 8 m，高 12.9 m。进口底坎高程 1675 m，设计最大泄流量 $2140 \text{ m}^3/\text{s}$ ，洞内最大流速达 45 m/s。右岸排沙洞，洞身长 615.5 m。孔口宽 2 m，高 2.8 m。进口底坎高程 1665 m，设计最大泄流量 $105 \text{ m}^3/\text{s}$ 。5 台机组最大引用流量 $1376 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

运行效益 到 1988 年底累计发电 772.86 亿 kW·h，担负西北电力系统的调峰、调频和事故备用任务。可使兰州市百年一遇洪水洪峰流量由 $8500 \text{ m}^3/\text{s}$ 削减为 $6500 \text{ m}^3/\text{s}$ 。经水库调节使下游梯级水电站提高保证出力 50%。从 1969 年至 1988 年向下游累计供水 154.55 亿 m^3 ，灌溉面积达 1500~1600 万亩，保证

率从 65% 提高到 85%，满足了兰州、银川等城市的供水需要。在防凌方面，建库前一般每 2 年发生一次冰塞，建库后 20 年尚未发生。

工程施工 主体工程量：土石方开挖 847 万 m^3 ，混凝土浇筑 182 万 m^3 。库区淹没耕地 7.77 万亩，移民 3.38 万人。工程总投资 6.38 亿元，单位投资 520 元/kW。

设计和施工单位 北京勘测设计院设计，水利电力部第四工程局施工。

(李维藩)

liubianxue

流变学 (rheology)

研究材料在应力和环

境条件作用下与时间有关的变形和流动规律的力学分支学科。几乎所有材料都有时间效应。材料在应变恒定情况下,应力随时间变小的现象称为应力松弛。在应力保持不变时,材料继续变形的现象称为蠕变或徐变。其共同特点为材料常数是时间的函数。流变学研究的主要内容有粘弹性、蠕变(粘塑性)、应力松弛、流体流变学和动力载荷下的流变问题等。流变学所遇到的问题十分复杂,人们为了简化计算,常提出一些简化模型来描述流变的主要特性。在研究粘弹性时,有麦克斯韦(J. C. Maxwell)体、佛克脱(W. Voigt)体和标准线性体等模型。在研究流体流变时有牛顿(I. Newton)体、宾厄姆(E. C. Bingham)体等模型。流变学在水电工程中有许多重要应用,如灌浆材料和工艺的改进、地基和隧洞的设计计算等。此外,流变学在地球科学、化学和生物学中也有许多重要应用。

(范天佑)

liuliang ceyan

流量测验 (discharge measurement) 对江河渠道水流量的实地测量。流量是单位时间内通过某一断面的水量,单位为 m^3/s 。江河的流量随时间而变化,通常不直接用实测流量值来反映流量变化过程,而是通过有限的实测流量与相应水位建立水位流量关系,用连续的水位观测资料推算流量过程及其特征值。建立水位流量关系的实测流量应包括高中低水位情况。

流量测验方法按其原理分为流速面积法、建筑物测流法和稀释法3大类。中国及世界上大部分国家流量测验以流速面积法为主。英国等国家较多采用量水建筑物测流。

流速面积法 通过实测断面上的流速和过水面积推求流量的方法,分为流速仪法、浮标法、比降法和超声波法4种。

(1) **流速仪法**。是最基本的流量测验方法。通常是设置垂直于流向的测流断面,沿断面设若干垂线,测量各垂线的水深及各垂线距岸边固定点的距离,以确定各垂线的间距。计算各垂线间的部分面积和断面总面积。根据水深大小,用流速仪在每个垂线上的一点或几点测量流速,以计算各部分面积的平均流速,用各部分面积和平均流速计算部分流量,其总和为全断面流量。一般用测深杆、测深锤(或铅鱼)或回声测深仪测量水深。用经纬仪、六分仪或测距仪测各垂线的间距。过河设备在平原宽河道多用测船,山区窄河道多用缆道。当有足够的垂线且每条垂线有较多的测点时此法测验成果精度较高。

近年来对于宽的河流及河口采用较快速的动船

法,即在测船沿断面横渡过程中,实测水深及用特制流速仪实测水面下固定深度(通常为水面下1 m深)处的水流和测船的合成速度,用以计算流量,精度虽稍差,但节约测流时间。

(2) **浮标法**。通过测定水面或水中的天然或人工投掷的浮标物随水流运动的速度以推求流量的方法。通常垂直于流向设置上、中、下三个断面,从上游投掷浮标,测定其流经上下断面的历时和经过中断面的位置,以上下断面间的距离除以漂流历时,求出浮标流速按其在中断面的位置绘出流速沿断面分布曲线,并求得各部分的浮标流速,乘以“浮标系数”换算成部分平均流速,再用实测的断面资料计算流量。浮标流经各断面的位置用普通测量仪器观测。浮标型式有水面浮标、浮杆和深水浮标等,相应具有不同的浮标系数,根据试验或经验采用。水面浮标的浮标系数一般为0.8~0.9。大洪水时期难以用流速仪测流时常用水面浮标测流。

(3) **比降法**。通过实测或调查河段的水面比降和过水断面积用水力学公式推求流量的方法。通常使用水力学中的曼宁(Manning)公式

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

$$Q = Av$$

式中 v 为流速, m/s ; n 为糙率; R 为水力半径, m (常用平均水深代替); S 为水面比降; Q 为流量, m^3/s ; A 为断面面积, m^2 。此法精度较差。

(4) **超声波法**。即在河流两岸设置发射和接收超声波的装置,其位置的连线斜向水流,利用超声波斜向上游和斜向下游传播的时间差与流速的函数关系测量流速。此法操作简单,能连续测流,数据可自记、远传,但设备费用较高,尚未普遍使用。

建筑物测流法 利用标准型的测流建筑物或河渠中已建的水工建筑物测定流量的方法。通过跨河建筑物上游水位、上下游水位差、闸门开度与泄流量的函数关系,用水力学公式推算流量。测流建筑物的型式有薄壁堰、三角堰、宽顶堰、巴歇尔量水槽等,其流量系数在实验室用模型率定或在现场率定。此法工作方便精度较好,但造价较高,一般用于中小河流及人工渠道。利用已建的水工建筑物如闸、坝、溢洪道、水电站等测流亦是经济实用的方法,其流量系数一般要在现场实测率定,也可通过模型试验率定。

稀释法 在测验河段的上断面注入一定浓度的示踪剂,经水流充分混合后,在下游取样断面测定稀释后示踪剂浓度或稀释比率来推求流量的方法。示踪剂有等速注入和一次注入两种方法。示踪剂主要有食盐、重铬酸钠、同位素、荧光染料等。测定示踪剂浓度的方法,随采用示踪剂种类不同及注入方法不同而变,有直接

流 体

测定浓度法、比色分析法、电导率法及荧光分析法等。稀释法不需装置过河设备或修建测流建筑物，不需测流速及断面面积，野外工作量较小，适用于水流紊动强的较小河流。但使用同位素作示踪剂时，应注意安全。

(李久昌)

liuti lixue

流体力学 (fluid mechanics) 研究各种力的作用下流体运动规律的科学，是力学的一个分支。

研究内容 分为3部分：流体静力学，研究静止流体的平衡及压力分布；流体运动学，研究流体运动的几何性质，用拉格朗日法或欧拉法描述流体质点的位置、速度、加速度或流动空间的速度分布；流体动力学，研究流体在力的作用下的运动规律及其与边界的相互作用，主要包括流体的应力与变形率的关系，运动的基本方程组等。

按研究对象划分，流体力学的主要分支为：气体动力学 [gas dynamics，其中主要是空气动力学 (aerodynamics)]，液体动力学 (hydrodynamics) 和水力学 (hydraulics)。

研究方法 分为理论分析、实验研究及数值计算3个方面。

(1) 理论分析。首先是建立力学模型，如早期学者为简化方程，假定流体为无粘性和不可压缩的理想流体模型，近代则有考虑流体粘性的牛顿流体模型以及考虑流体压缩的模型等。其次是建立数学模型，即依据物理规律和针对流动特点用数学方程表达力学模型。最后是求解方程并对结果进行分析。

(2) 实验研究。通过流体运动的量测直接寻求流体参数之间的定量关系，总结出实用的经验公式。实验研究分为现场观测和实验室模拟两种，现场观测能获得流动的天然真实资料，但工作量及费用浩大，且难以在控制条件下作系统研究；实验室模拟可以有控制地系统地进行，但存在缩尺影响，实际常是两者结合进行。

(3) 数值计算。流体运动的基本方程组多是非线性偏微分方程，难于用解析法求解。随着电子计算机的发展，流体力学日益广泛采用数值计算方法，即将基本微分方程离散为有限差或有限元形式，以各种数值计算方法，应用计算机求近似解。计算结果通常需要和实验结果比较、验证。

对于复杂的流体力学问题，需要用几种方法结合起来进行研究。

简史及发展 流体力学的知识最早起源于对自然现象的观察和生产劳动的经验，随着生产和技术的进步而不断发展。有记载的定量规律，始于希腊的阿基米

德的浮力定理，它为流体静力学奠定了基础。15世纪意大利达·芬奇的著作中谈到水波、管流、水力机械、鸟的飞翔等原理。十七世纪牛顿对流体的内摩擦力和流体的阻力都提出了重要的定律，奠定动力学的基础。十八世纪伯努利(D. Bernoulli)提出联系流速、压力和位置的方程，欧拉(L. Euler)建立了理想流体运动的微分方程，纳维(C. -L. -M. -H. Navier)和斯托克斯(G. G. Stokes)分别建立了粘性流体运动方程，流体动力学的理论有了长足的发展。1904年普朗特(L. Prandtl)创立了边界层理论，边界层内粘性流动的方程得到简化而较易求解，边界层外的流动可以忽略粘性，使理论与实用两种途径得到统一，逐渐形成现代流体力学的格局。19世纪末雷诺(O. Reynolds)提出实际流体存在层流和紊流(湍流)两种流动状态，并建立了研究紊流的平均化方法，使流动机理的研究引向深化。

20世纪以来，现代化量测技术(如热线、激光、高速摄影、微机控制以及各种电测仪器)的进步，使显示和量测复杂流动成为可能；数值计算方法的发展和广泛应用，能够求解许多过去难以解决的问题；这两种手段的发展，体现了现代流体力学的特点。同时，现代生产建设对流体力学不断提出了新要求，如：飞机和航天飞行器的出现，推动了高速的气体流动和稀薄气体流动的研究；巨型水利水电工程建设和海洋的开发使古老的水力学得到新的发展。近二三十年流体力学出现了很多新的分支，除计算流体力学和多相流体力学这两个分支有很大发展以外，还和其他学科互相交叉渗透形成许多交叉学科或边缘科学，如：物理化学流体力学、等离子体流体力学、电磁流体力学、生物流体力学、地球流体力学及环境流体力学等。

参考书目

普朗特 L 等著，流体力学概论，郭永怀，陆士嘉译，北京：科学出版社，1981
易家训著，流体力学，章克本，张涤明，陈启强，蔡崇喜译，北京：高等教育出版社，1983

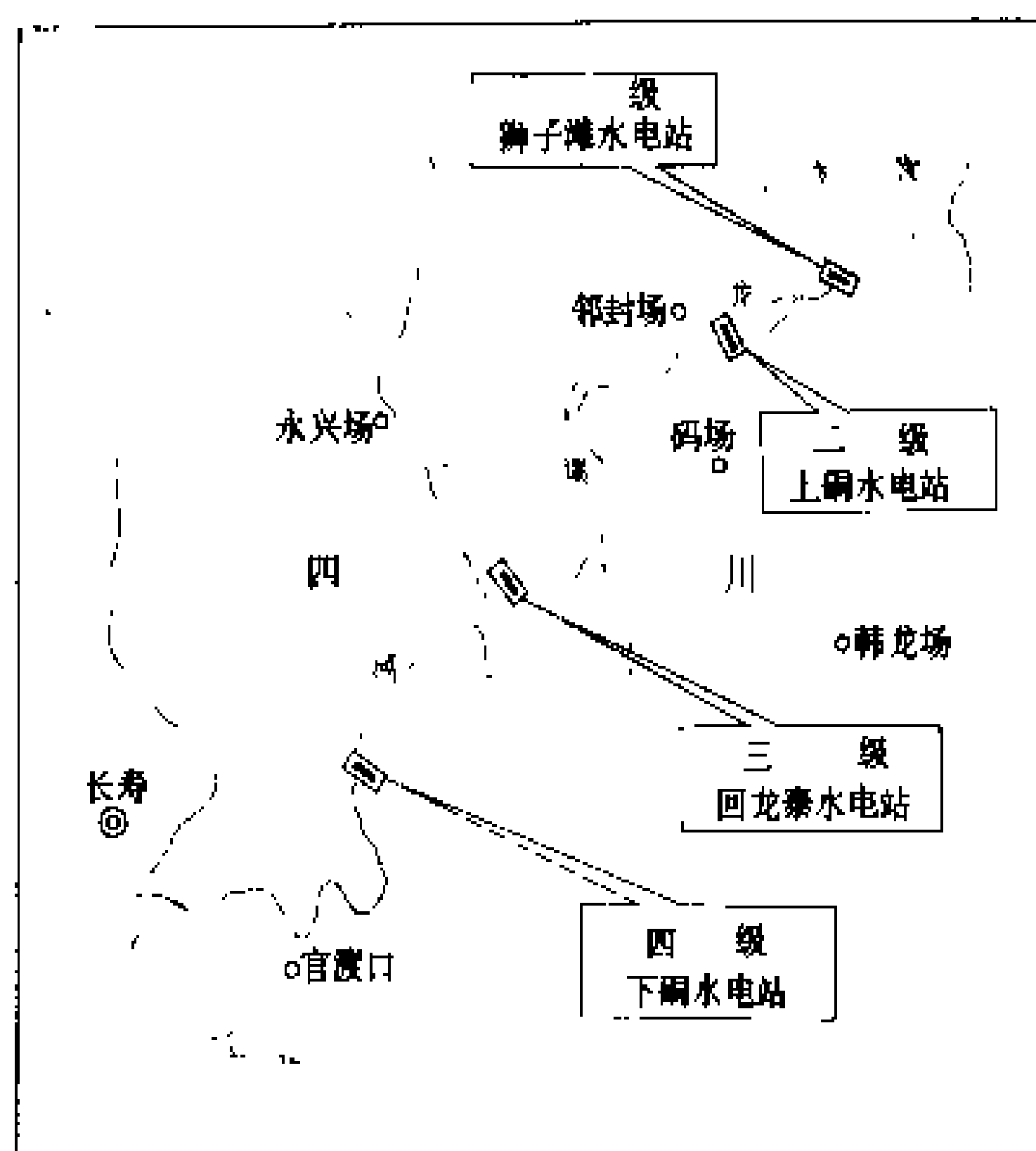
(余常昭)

Longxihe Tiji Shuidianzhan

龙溪河梯级水电站 (Longxihe Cascade Hydropower Stations) 位于中国四川省东南部，由狮子滩、上硐、回龙寨、下硐等4座水电站组成。

龙溪河是长江上游北岸的一条支流，蜿蜒穿行于四川省东南部丘陵之间，在长寿县附近汇入长江，全长约170 km，流域面积3280 km²。河道上游较平坦，下游陡峻。狮子滩至下硐河段长24 km，天然落差约140 m，集中在狮子滩、跳石、上硐、回龙寨、下硐等处，龙溪河梯级水电站就是利用这些集中落差修建的，其

位置如图所示。



龙溪河梯级水电站位置示意图

龙溪河梯级开发始于1936年，曾进行过规划设计，拟定的梯级水电站为4级，与现在的4座水电站的位置相同，装机容量分别为15 MW，10 MW，6 MW和33 MW，总计64 MW。1949年中华人民共和国成立前，仅完成了下碛水电站初期的3.04 MW机组和回龙寨、上碛水电站的部分工程。1949年11月末，下碛水电站被国民党军队破坏。中华人民共和国成立后，重新进行了规划，加高狮子滩大坝，扩大调节库容，使4座水电站的总装机容量达104.5 MW，多年平均年发电量为5.16亿kW·h。1950年9月上碛水电站动工开始修建，至1959年3月下碛水电站竣工为止，龙溪河梯级水电站全部建成。总投资1.3885亿元，平均每千瓦投资1329元。

至1990年底，累计发电147.01亿kW·h，按电力系统发电企业1990年不变价格计算，累计产值11.59亿元。平均发电成本0.01074元/(kW·h)。狮子滩水库优化调度图用动态规划法编制，龙溪河梯级水电站以此调度图为准实行优化调度，与用时历法调度图相比，1981~1990年间平均每年多发电2190万kW·h，比多年平均年发电量增加了4.2%。

一级狮子滩水电站先后由北京(水电)勘测设计院和成都(水电)勘测设计院设计，四川省水电工程局施工。其余梯级均由水利电力部成都勘测设计院设计，四川省水电工程局施工。

一级狮子滩水电站位于长寿县城东北20 km。水库总库容10.28亿m³，为多年调节水库。设计水头64.3 m，最大水头71.5 m，最小水头45 m。电站采用混合式开发。枢纽主要建筑物包括堆石坝、溢洪道、引

水系统和厂房等。堆石坝最大坝高51 m，采用了能适应不均匀沉陷变形的楔形结构。溢洪道设在左岸堰口，5孔溢流孔，均宽18 m，高7 m，最大总泄流量6390 m³/s。引水系统包括进水明渠、进水口、引水隧洞、调压井及压力管道等。引水隧洞长1460 m，洞径5 m，末端设差动式调压井。地面厂房装有4台单机容量12 MW的混流式水轮发电机组。水电站于1954年9月开工，1956年12月发电，1957年3月竣工。

二级上碛水电站位于狮子滩水电站下游约5 km处，混合式开发。设计水头26.8 m，最大水头29 m，最小水头24 m。拦河坝为砌石重力坝，坝顶溢洪，最大泄流量3600 m³/s。引水式地下厂房，装有1台3 MW和1台7.5 MW的混流式水轮发电机组。工程于1946年开始兴建，1949年5月停工，仅完成工程量的30%。中华人民共和国成立后，于1950年9月复工，1953年12月第一台容量为3 MW的机组发电，1956年9月另一台容量为7.5 MW的机组投入运行。

三级回龙寨水电站位于上碛水电站下游约10 km处，引水式开发。设计水头20.5 m，最大水头21.7 m，最小水头17.8 m。枢纽主要建筑物有浆砌石重力坝、引水明渠、无压隧洞、调压池、压力水道及厂房。采用坝顶溢洪方式，最大泄流量2700 m³/s。引水式岸边厂房，装有2台单机容量为8 MW的混流式水轮发电机组。工程于1940年开工，1944年停建，中华人民共和国成立后，于1956年11月复工，1957年12月第一台机组发电，1958年12月竣工。

四级下碛水电站位于回龙寨水电站下游约7 km，混合式开发。设计水头48.2 m，最大水头52 m，最小水头39 m。坝型为块石混凝土重力坝，坝顶溢洪，最大泄流量2700 m³/s。引水式岸边厂房，装有2台单机容量为15 MW的混流式水轮发电机组。下碛水电站曾于1939年开工，1943年建成发电，当时设计为明渠引水式水电站，装机容量3.04 MW，解放前夕被国民党军队破坏。中华人民共和国成立后，于1957年7月开始改建，1958年6月第一台机组发电，1959年3月竣工。

(杨德晔)

Longyangxia Shuidianzhan

龙羊峡水电站 (Longyangxia Hydropower Station) 位于黄河干流上游青海省共和、贵德县境内，距西宁市147 km，以发电为主，兼有防洪、灌溉、供水等综合利用效益。装机容量1280 MW，保证出力589.8 MW，年发电量59.42亿kW·h。以6回330 kV输电线路接入西北电网，供电给青海、甘肃、陕西、宁夏四省区。主坝为混凝土重力拱坝，最大坝高



178 m。1976 年开工，1987 年 9 月第 1 台机组发电，1992 年全部机组投运。

物有表孔、中孔、深孔及底孔 4 层。右岸设 2 个表孔溢洪道，弧门孔口尺寸为 $12\text{ m} \times 17\text{ m}$ ，堰顶高程 2585.5

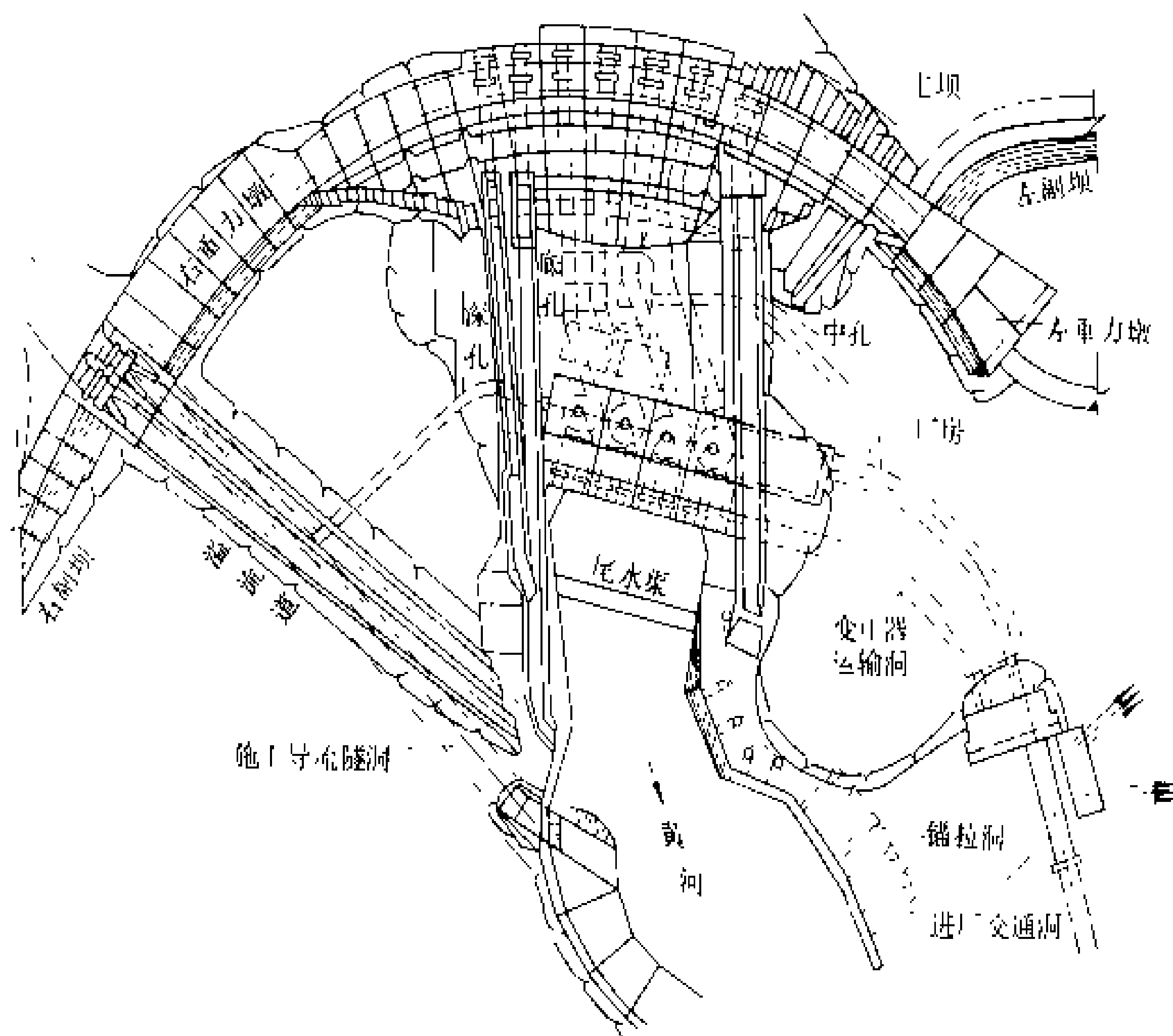
m，最大泄流量 $4493\text{ m}^3/\text{s}$ 。左岸中孔泄水道弧门孔口尺寸 $8\text{ m} \times 9\text{ m}$ ，进口底坎高程 2540 m，最大泄流量 $2203\text{ m}^3/\text{s}$ 。右岸深孔及底孔泄水道弧门孔口尺寸均为 $5\text{ m} \times 7\text{ m}$ ，进口底坎高程分别为 2505 m 和 2480 m，最大泄流量分别为 $1340\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1498\text{ m}^3/\text{s}$ 。各泄水建筑物均采用挑流消能方式，其中表孔和中孔采用窄缝式挑流鼻坎。

厂房为坝后地下混合式厂房，位于大坝下游约 60~70 m 处，呈“一”字形。安装间位于主厂房左端地下。用坝内压力钢管引水，钢管内径 7.5 m，管壁厚 20~40 mm。主厂房内设 4 台 320 MW 的混流式水轮发电机组（参见彩图插页第 7 页

8 图）。水轮机转轮直径 6 m，转速 125 r/min，额定出力 325.6 MW，最高效率 93%，设计点效率 91.5%。水轮发电机为半伞式，额定电压 15.75 kV，额定容量 $355.6\text{ MV} \cdot \text{A}$ ，额定功率因数 0.9。采用发电机-变压器单元接线。330 kV 侧采用双母线单分段带旁路隔离开关的接线。4 台三相双线圈强油循环水冷变压器，每台容量 $360\text{ MV} \cdot \text{A}$ ，布置在尾水平台上。330 kV 气体绝缘金属封闭电器布置在尾水平台上的副厂房内。（参见彩图插页第 26 页 50 图）

工程施工 采用断流围堰，右岸隧洞泄水，基坑全年施工的导流方式。按二十年一遇洪水标准（ $Q=4000\text{ m}^3/\text{s}$ ）设计导流隧洞。施工对外交通采用公路运输。主体工程工程量为：石方开挖 334 万 m^3 ，混凝土浇筑 316.5 万 m^3 ，钢筋、钢材及金属结构约 6.8 万 t。

综合效益 由于水库的调节作用，增加了下游已建的刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡 4 个水电站的保证出力共 254.8 MW 和年发电量共 5.13 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。经龙羊峡水库调节，可削减下泄洪峰流量 3040~4500 m^3/s ，使刘家峡水电站的防洪校核标准由五千年一遇提高到可能最大洪水，使盐锅峡水电站防洪校核标准由千年一遇提高到两千年一遇，使八盘峡水电站防洪校核标准由三百年一遇提高到千年一遇。同时也相应提高了下游城镇和兰新、兰青、包兰等铁路干线的防洪标准。与刘家峡水库联合调节，每年可以满足黄河上游



龙羊峡水电站枢纽布置图

水文和水库特性 坝址以上流域面积 131420 km^2 。坝址多年平均流量 $650\text{ m}^3/\text{s}$ ，多年平均年径流量 205 亿 m^3 。多年平均输沙量 2490 t，含沙量 $1.21\text{ kg}/\text{m}^3$ 。设计洪水流量（ $p=0.1\%$ ） $7040\text{ m}^3/\text{s}$ ，相应库水位 2602.25 m。校核洪水流量（可能最大洪水） $10500\text{ m}^3/\text{s}$ ，相应库水位 2607 m。总库容 276.3 亿 m^3 。正常蓄水位 2600 m，相应库容 247 亿 m^3 。死水位 2530 m，调节库容 193.5 亿 m^3 ，具有多年调节性能。电站设计水头 122.0 m，最大水头 148.5 m，最小水头 75.5 m。

坝址地形和地质 坝址区受河西系构造影响，地震基本烈度为 8 度，主要水工建筑物按 9 度设防。坝址所处的龙羊峡峡谷，为“V”形河谷，深切 150 余 m。河流自西向东，平水期水深约 10 m，水面宽 30~40 m。河谷顶部宽约 200 m。坝轴线下游约 300 m 处，有大断层横切河床，形成冲沟。两岸坝肩山体较为单薄。除右岸副坝局部坝段外，建筑物地基为坚硬的花岗闪长岩，但断裂较为发育。近坝库区右岸为超固结粘性土为主的河湖相地层，岸坡高达 300~500 m。为大坝安全运行，在岸坡地带设置了滑坡监测系统，并采取分期蓄水措施。

枢纽布置 枢纽由主坝、左右岸混凝土重力墩、泄水建筑物及引水发电建筑物等组成，见图。挡水建筑物前沿总长度 1226 m，其中主坝长 396 m，坝顶高程 2610 m，最大坝高 178 m，最大底宽 80 m。泄水建筑

河段(内蒙古河口镇以上)各省区工农业和城镇用水 127 亿 m^3 , 并补给河口镇以下工农业用水 $250 \text{ m}^3/\text{s}$ 。使河口镇以上净增农田保灌面积 473 万亩。此外, 还有防凌、养殖、旅游等效益。水库仅淹没耕地 8.67 万亩, 迁移人口 2.97 万人。

设计和施工单位 西北勘测设计院设计, 水利电力部第四工程局施工。

(潘长龄)

Lubuge Shuidianzhan

鲁布革水电站 (Lubuge Hydropower Station)

位于南盘江支流黄泥河上, 云南省罗平县和贵州省兴义县境内, 距昆明市 320 km, 为引水式水电站。主要任务为发电。装机容量 600 MW, 保证出力 85 MW, 多年平均年发电量 28.49 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 以 220 kV 和 110 kV 电压输电线路接入云南省电力系统。主要供电给昆明、宣威、曲靖并向贵州兴义地区送电。主坝为堆石坝, 最大坝高 103.8 m。工程于 1982 年开工, 1985 年底截流, 1988 年底第一台机发电, 1990 年底建成。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 7300 km^2 , 多年平均流量 $164 \text{ m}^3/\text{s}$, 多年平均年径流量 51.7 亿 m^3 。多年平均年输沙量: 悬移质 344 万 t; 推移质约 10.49 万 t。五百年一遇设计洪水流量 $6460 \text{ m}^3/\text{s}$ 。可能最大洪水校核, 洪峰流量 $10880 \text{ m}^3/\text{s}$ 。水库正常蓄水位 1130 m, 相应库容 1.11 亿 m^3 , 死水位 1105 m, 调节库容 0.74 亿 m^3 , 具有周调节性能。电站设计水头 327.7 m, 最大水头 372.5 m, 最小水头 295 m。

枢纽布置 坝址区地层以白云岩为主, 喀斯特作用微弱。

引水隧洞通过的主要地层为石灰岩和白云岩, 局部有砂页岩和泥灰岩分布。厂区岩层主要为灰质白云岩, 喀斯特较发育。图 1 为枢纽总平面布置图。

首部枢纽建筑物有堆石坝、泄洪建筑物、电站进水口及排沙设施, 见图 2。

堆石坝为土心墙堆石坝, 土心墙料采用近坝区的

坡积残积层红土和全风化砂页岩混合料。坝顶高程 1138 m, 顶宽 10 m, 全长 217.17 m, 上、下游边坡为 1:1.8。



图 1 鲁布革水电站枢纽总平面布置图

1—进水口建筑物; 2—坝; 3—引水隧洞; 4—调压井;
5—压力管道; 6—地下厂房

泄洪建筑物由左岸开敞式溢洪道和左、右岸泄洪隧洞组成。溢洪道有溢流孔 2 孔, 单孔净宽 13 m。泄槽总宽 30 m, 全长 553 m, 堰顶高程 1112.6 m, 最大泄流量 $6424 \text{ m}^3/\text{s}$ 。左岸泄洪隧洞全长 723.83 m, 进口底板高程 1080 m, 圆形有压段直径 11.5 m, 无压段尺寸为 $8.5 \text{ m} \times 12.88 \text{ m}$, 最大泄流量 $1995 \text{ m}^3/\text{s}$ 。右岸泄洪隧洞全长 681.08 m, 进口底板高程 1060 m, 圆形有压段直径 10 m, 无压段尺寸 $8.5 \text{ m} \times 10.87 \text{ m}$, 最大泄流量

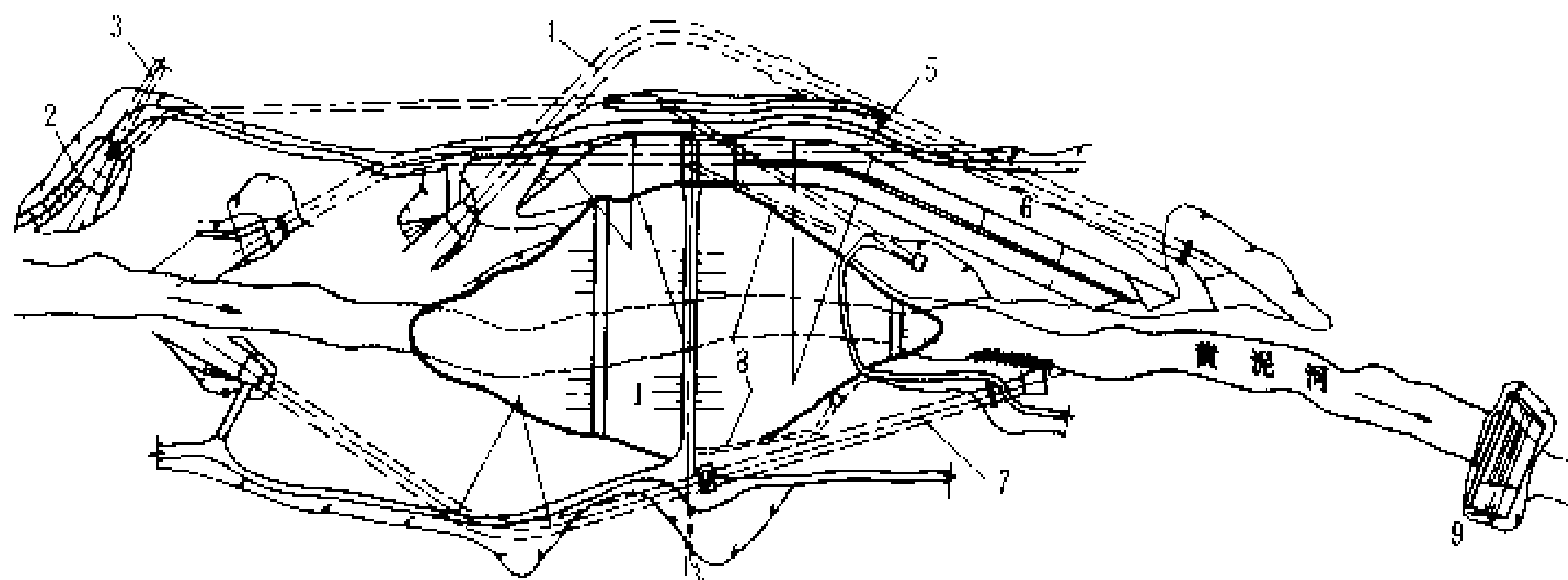


图 2 鲁布革水电站首部枢纽平面布置图

1—堆石坝; 2—进水口; 3—引水隧洞; 4—左岸泄洪洞; 5—导流洞; 6—溢洪道; 7—右岸泄洪洞;
8—交通洞; 9—二道坝

$1658 \text{ m}^3/\text{s}$ 。排沙洞 1 条, 直径 5 m, 设计泄流量 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

引水系统设在左岸, 包括 1 条内径为 8.0 m, 长 9387 m 的引水隧洞, 一座带上室的差动式调压井(大井内径 13 m, 高 63.9 m), 2 条地下埋藏式斜井高压主管道(内径 4.6 m, 长 468.1 m 及 469.5 m)和 4 条支管(内径 3.2 m)。厂房及变电站设在地下洞室内, 见图 3。地下厂房长 125 m, 宽 18 m, 高 39.4 m。厂内装有 4 台容量为 150 MW 的混流式水轮发电机组。主变压器室长 82.5 m, 宽 12.5 m, 高 26.9 m。室内设有 4 台双卷三相变压器、1 台自耦变压器和 220 kV, 110 kV 气体

绝缘金属封闭电器。

机电设备 混流式水轮机,转轮直径 3.442 m,最大水头 372.5 m,额定水头 312.0 m,最小水头 295.1 m,额定出力 153 MW,最大出力 172 MW,额定转速 333.3r/min,额定流量 53.5 m³/s,吸出高度 6.5 m。转轮带有副叶片,即在两个常规长叶片之间增加一片短

叶片,使栅叶密度增加,改善流态。同时,叶片受压面积增加,单位面积负荷减轻,汽蚀性能改善。这种转轮适用于高水头和水流含有泥沙的电站,它在部分负荷运行时效率较高,与一般混流式水轮机相比,有较宽的高效率区,厂家保证真机最高效率 94.6%,设计点效率 93.4%。

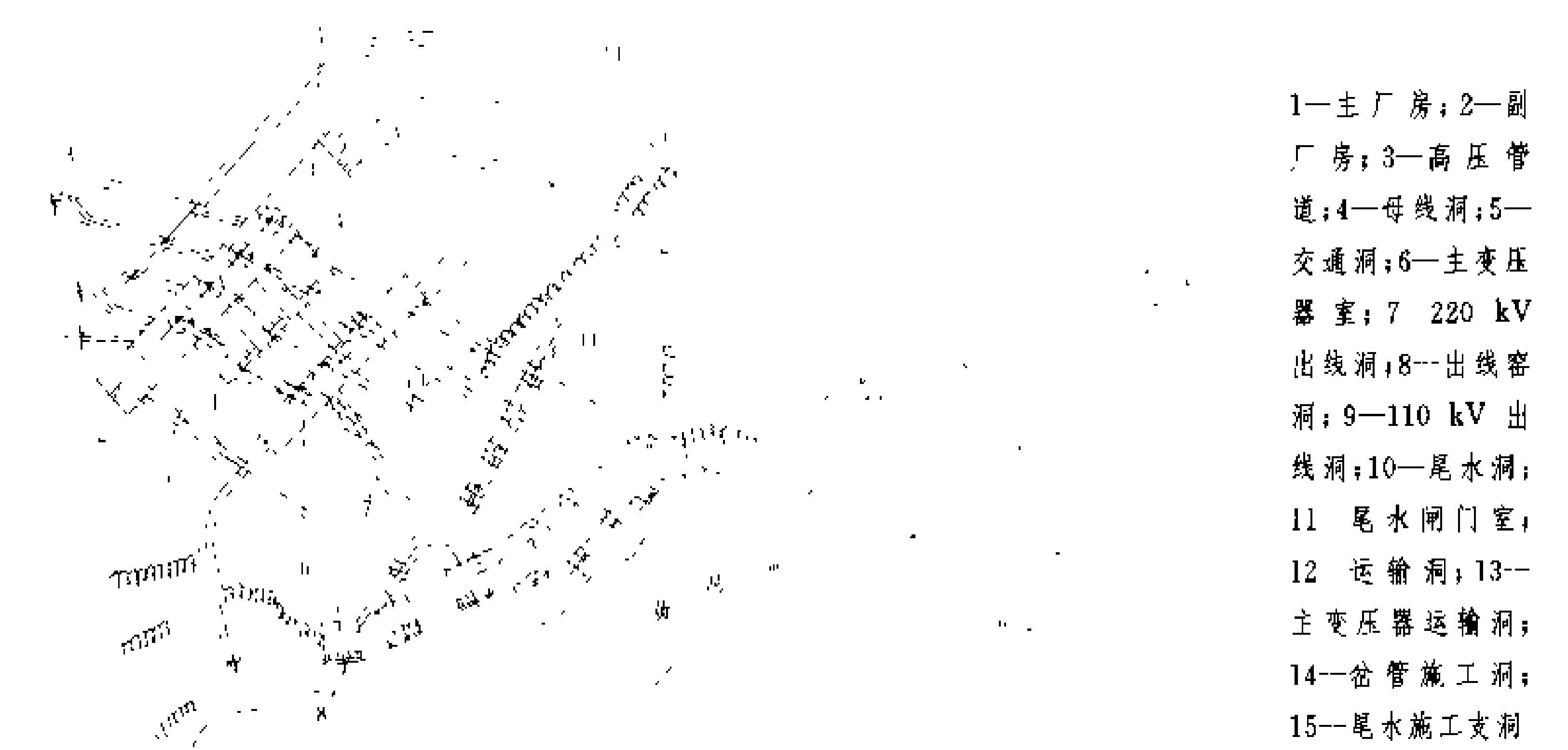


图3 鲁布革水电站厂区枢纽平面布置图

发电机为悬式空冷,额定出力 172 MV·A,额定功率因数 0.875,额定电压 15.75 kV,最大出力 198 MV·A,最高效率 98.58%,GD² 为 4000 t·m²,自熄灭型 F 级绝缘。

220 kV 主变压器为三相双绕组水冷钟罩式,每台 172 MV·A,与发电机组成单元接线。1 台 60 MV·A 三相自耦变压器将 220 kV 电压降压,向 110 kV 侧供电。

220kV 和 110kV 高压配电装置均采用气体绝缘金属封闭电器(GIS)。220 kV 侧为双母线接线,出线 3 回(含 1 回备用)。110 kV 侧为单母线不分段接线,出线 3 回(含 1 回备用)。

机电设备消防 在不同地区采用不同灭火方式:

- (1)主变压器和自耦变压器室用 HALOH1301 灭火,自动或手动投入。
- (2)发电机用 CO₂ 灭火,自动或手动投入。
- (3)母线廊道、电缆道和近区变压器室采用化学灭火剂,自动或手动投入。

(4)电缆室和 110 kV,220 kV 电缆用干粉手持灭火。

(5)主、副厂房各层和油库用水灭火,手动投入。
在主变压器室、发电机坑和油库等处设有手动投入的事故排烟专用通风系统。

工程施工 首部枢纽采用围堰一次断流、隧洞导流、基坑全年施工方式。引水隧洞采用钻爆法、光面爆破开挖,平均月进尺 230m。混凝土衬砌采用针梁式钢模浇筑。地下厂房开挖亦采用钻爆法、光面爆破施工。除尾水洞外,厂区洞室的永久支护均采用锚喷支护。主副厂房、主变压器(包括 GIS)室及尾水闸门室的吊车梁均为岩壁式。

总工程量:土石方明挖 152 万 m³,石方洞挖 140 万 m³,土石方填筑 223 万 m³,混凝土浇筑 72 万 m³,金属结构安装 5578t。

设计及施工单位 昆明勘测设计院设计,水利电力部第十四工程局施工。

(朱经祥)

M

Manwan Shuidianzhan

漫湾水电站 (Manwan Hydropower Station)

位于澜沧江中游河段、云南省云县和景东县境

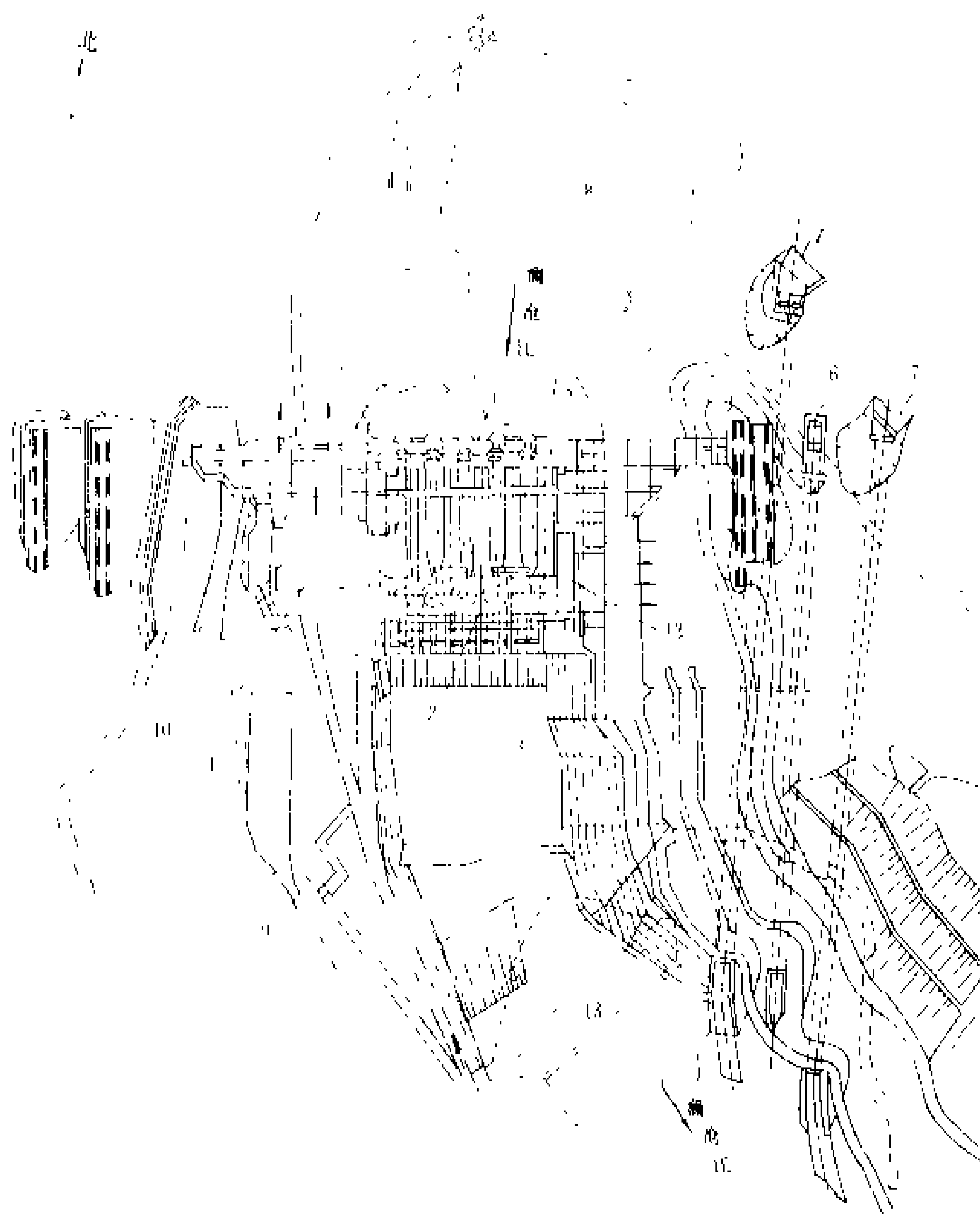
电量 63 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。在上游小湾水电站建成后,最终装机容量 1500 MW,与小湾水电站联合调节,保证出力 785 MW,年发电量 77.95 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。以 500 kV 输电线路 3 回和 220 kV 输电线路 2 回供电给云南电力系统和四川攀枝花市。混凝土重力坝最大坝高为 132 m。工程于 1986 年 5 月动工兴建,1987 年底截流,1993 年 6 月、12 月第一、二台机组相继发电。(参见彩图插页第 9 页 13 图)

水文和水库特性 坝址以上流域面积 114500 km^2 ,多年平均流量 1230 m^3/s ,多年平均年径流量 388 亿 m^3 。千年一遇设计洪水流量 18500 m^3/s ,五千年一遇校核洪水流量 22300 m^3/s 。水库正常蓄水位 994 m,相应库容 9.2 亿 m^3 ,死水位 982 m,死库容 6.3 亿 m^3 ;

防洪库容 0.33 亿 m^3 ;调节库容 2.57 亿 m^3 ,具有季调节性能。电站设计水头 89 m,最大水头 100 m,最小水头 69.3 m。

枢纽布置 见图。坝址区主要岩层为流纹岩。拦河坝全长 418 m,坝顶高程 1002 m,河床中部设溢流坝段。枢纽的泄洪建筑物包括溢流坝表孔,左岸泄洪隧洞和坝体内的泄洪冲沙底孔。表孔共 5 孔,堰顶高程 974 m。孔口宽 13 m,高 20 m,弧形闸门控制。宣泄设计及校核洪水时,相应库水位分别为 994.0 m 和 999.4 m,泄流量分别为 11981 m^3/s 和 17480 m^3/s 。采用厂前挑流方式消能,水垫塘进行预挖并用混凝土保护。左岸泄洪隧洞进口高程 965.5 m,有压洞段尺寸 12 m \times 12 m,无压洞段尺寸 12 m \times 15 m,可宣泄的设计及校核洪水分别为 2348 m^3/s 和 2670 m^3/s 。靠近左岸的坝体内设有双孔泄洪、冲沙底孔,进口高程 925 m,孔口尺寸 5 m \times 8 m,设计及校核泄流量分别为 2512 m^3/s 和 2621 m^3/s 。右岸坝体下部还设有一个冲沙底孔,进口高程 896 m,压力段钢管直径均为 6 m,出口设 3.5 m \times 3.5 m 弧形工作闸门控制。

一期工程厂房布置在溢流坝坝后,厂顶挑流。5 条



漫湾水电站枢纽平面布置图

- 1 溢流坝; 2 厂房; 3—坝下游水垫塘; 4—右岸冲沙底孔; 5—左岸双泄洪、冲沙底孔;
6 左岸泄洪隧洞; 7—导流隧洞; 8—上游围堰; 9—进厂交通洞; 10—主变压器场;
11—500 kV 高压配电装置楼; 12—220 kV 高压配电装置楼; 13 下游土石围堰

内,距昆明市 504 km,有公路相通。工程分两期建设。
一期装机容量为 1250 MW,保证出力 352 MW,年发

压力钢管直径均为 7.5 m, 主厂房总长 195 m, 宽 34.5 m, 高 59.5 m。厂内安装 5 台单机容量为 250 MW 的混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径 5.5 m, 额定转速 125 r/min, 额定出力 255.1 MW, 最大效率 94.4%, 设计点效率 92.5%。发电机为半伞式、空冷, 额定电压 15.75 kV, 额定容量 285.7 MV·A, 额定功率因数 0.875。13 台 500 kV 单相双绕组升压变压器组成 4 组, 每组 300 MV·A, 1 台备用。1 台 220 kV 三相升压变压器, 容量 300 MV·A。4 台 500 kV/220 kV 单相双绕组自耦变压器, 单台容量 150 MV·A, 作为系统间的联络, 其中 1 台备用。220 kV 和 500 kV 气体绝缘金属封闭电器分别布置在左右岸非溢流坝坝后。

二期工程, 右岸另建地下式厂房, 安装 1 台同型同容量机组。

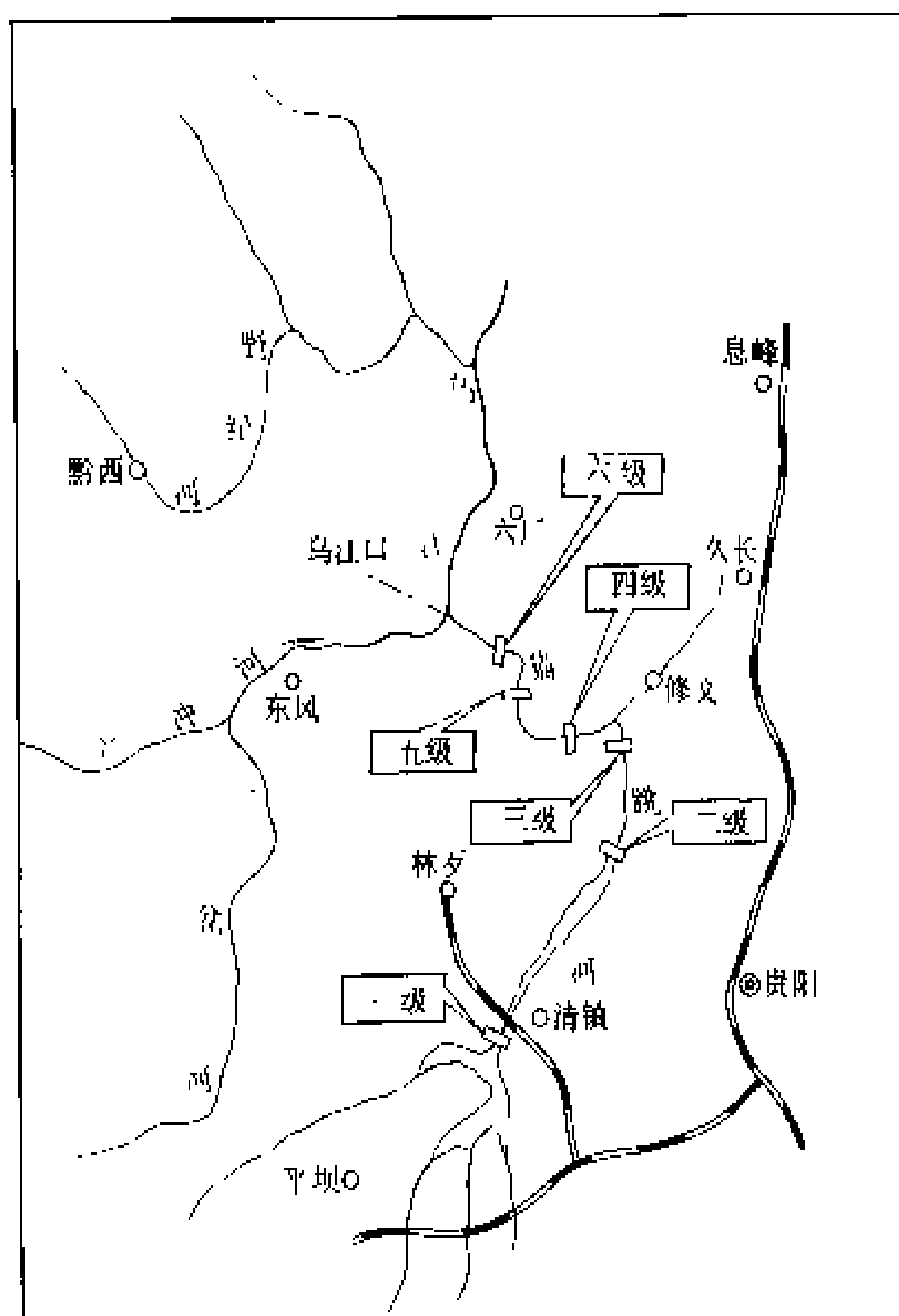
工程施工 施工导流采用土石围堰一次断流、左岸隧洞导流方式。左岸 2 条导流隧洞平行布置, 方圆形断面, 尺寸为 15 m×18 m。进口底板高程分别为 890 m 和 895.2 m。

总工程量为: 土石方明挖 1236 万 m³, 石方洞挖 46.5 万 m³, 混凝土和钢筋混凝土 250 万 m³, 金属结构安装 7558.6 t。

设计及建设单位 昆明勘测设计院设计。漫湾水电站工程管理局建设。

(朱经祥)

负电力系统调峰、调频和事故备用任务。截至 1990 年底, 累计发电 117.834 亿 kW·h, 平均发电成本 0.01971 元/(kW·h)。按电力系统发电企业 1990 年不变价格计算, 累计产值 9.2954 亿元。



猫跳河梯级水电站位置示意图

Maotiaohe Tiji Shuidianzhan

猫跳河梯级水电站 (Maotiaohe Cascade Hydropower Stations) 位于中国贵州省中部, 由红枫、百花、修文、窄巷子、红林、红岩等 6 座水电站组成。

猫跳河为长江水系乌江的支流, 全长 180 km, 天然落差 550 m, 流域面积 3195 km²。红枫以上为上游, 红枫至百花为中游, 百花以下为下游。上、中游为丘陵及山岳地区。下游为高深峡谷, 谷深多在 200~300 m, 河床坡降达 0.705%, 其中修文至林家屋长 19 km 河段, 落差达 204 m, 河床坡降达 1.1%。沿岸为石灰岩地层, 喀斯特发育, 构造复杂。猫跳河梯级水电站是中国在喀斯特地区最早修建的水电站群, 其位置见图所示。

全河 6 级, 共利用落差 384.5 m, 总装机容量 239 MW, 多年平均年发电量 9.182 亿 kW·h。1958 年 8 月一级红枫水电站开工, 1980 年 2 月梯级各水电站全部建成投产, 总投资 4.5456 亿元, 每千瓦投资 1901.9 元。

在乌江渡水电站建成前, 猫跳河梯级水电站为贵州省贵阳地区的主力电源, 乌江渡水电站建成后, 仍担

除发电效益外, 红枫、百花两水库灌溉农田 11.3 万亩, 使粮食亩产由 200 kg 增加到 500 kg 以上, 并供给贵阳、清镇等市工业企业和生活用水。两水库已成为解决贵阳用水的远景规划方案中的主要水源。此外, 还发展了水产养殖, 开辟了旅游资源。红枫湖畔已形成了新的经济区和旅游区, 经济效益和社会效益显著。

猫跳河梯级水电站由贵阳(水电)勘测设计院设计, 先后由贵州省水电工程局和水利电力部第九工程局施工。

一级红枫水电站 位于贵阳市西南 35 km, 拦河坝为木斜墙堆石坝, 最大坝高 52.5 m, 已在斜墙垫层中灌浆加固。水库总库容 6.42 亿 m³, 是全梯级的龙头水库, 与百花水库联合运用, 使猫跳河枯水期流量由 2 m³/s 提高到 20 m³/s; 使 6 座水电站的保证出力由 6.15 MW 提高到 61.89 MW。开敞式溢洪道布置在坝左岸 300 m 处的堰口, 设 2 孔溢流孔, 孔口高 6 m, 宽 12 m, 用弧形闸门控制, 最大泄流量 3640 m³/s。引水兼放水隧洞布置在右岸, 长 204.5 m, 洞径 5 m。设计水头 35.4 m, 最大水头 41 m, 最小水头 22.8 m。地面式厂房位于右岸坝后, 装有 2 台单机容量 10 MW 的混流式水轮发电机组。工程于 1958 年 8 月开工, 1960



年5月第一台机组发电,1960年9月竣工。

二级百花水电站 位于红枫水电站下游26 km,拦河坝为钢筋混凝土斜墙堆石坝,最大坝高48.7 m。右岸300 m处的垭口设有3孔胸墙式溢洪道,最大泄流量2010 m³/s,采用挑流消能。右岸还有1条由导流隧洞改建的长196 m洞径3 m的放水底孔。2条长185 m洞径3.6 m的引水隧洞也设在右岸。设计水头37.6 m,最大水头42.7 m,最小水头35.26 m。地面式厂房位于右岸岸边,装有10 MW和12 MW的混流式水轮发电机组各1台。工程于1960年4月开工,1966年6月第一台机组发电,1966年12月竣工。

三级修文水电站 位于百花水电站下游17 km处。坝址河谷狭窄,呈“U”形。拦河坝为薄拱坝,最大坝高49 m,厚高比0.22。采用厂顶溢流,溢流段净宽42 m。设溢流孔5孔,最大泄流量1510 m³/s。3孔采用宽10 m高5 m的弧门控制;2孔采用宽6 m高5 m的弧门控制。尾部用挑流消能。设计水头35.4 m,最大水头39 m,最小水头28 m。厂房内装有2台单机容量10 MW的混流式水轮发电机组。工程于1960年1月开工,1961年6月第一台机组发电,1961年7月竣工。

四级窄巷口水电站 位于修文水电站下游5 km。坝址河谷深切,河床覆盖层深达25~30 m。拦河坝采用“拱上拱”形式,即跨河修建实腹拱桥,桥上修建双曲拱坝,最大坝高54.8 m。采用双排混凝土防渗墙作坝基覆盖层防渗处理。溢洪道为坝顶滑雪道式,泄洪槽长46.5 m,以防止基础防渗墙被水流淘刷。5孔溢流孔,均由宽10 m高4 m的弧形闸门控制,最大泄流量3100 m³/s。设计水头46.2 m,最大水头63.2 m。隧洞引水、岸边式厂房,装有3台单机容量15 MW的混流式水轮发电机组。工程于1965年8月开工,1970年10月第一台机组发电,1975年7月竣工。

五级红林水电站 位于窄巷口水电站下游15 km处,为引水式水电站,利用天然落差146 m,装机容量102 MW。拦河坝为混凝土溢流重力坝,最大坝高26 m,溢流段长56 m,最大泄流量3180 m³/s。右岸引水隧洞长5316 m,洞径6 m。末端设有内径12 m高27 m的简单溢流式调压井。调压井后为压力管道,经过岔管,分为3条支管进入厂房。设计水头142.4 m,最大水头144.9 m,最小水头134.2 m。厂房内装有3台单机容量为34 MW的混流式水轮发电机组。工程于1965年12月开工,1979年12月第一台机组发电,1980年2月竣工。

六级红岩水电站 位于红林水电站下游10 km处。拦河坝为双曲拱坝,最大坝高60 m。坝体设有5孔泄洪中孔,各宽7 m,高6.4 m,最大泄流量3430

m³/s。右岸引水隧洞,长109.45 m,洞径5.5 m。末端分为2条内径5~3.4 m长分别为81.7 m和95.6 m的压力管道进入厂房。设计水头46.2 m,最大水头48.8 m,最小水头38.6 m。厂房为岸边式,厂房内装有2台单机容量为15 MW的混流式水轮发电机组。工程于1971年9月开工,1974年7月第一台机组发电,1974年12月竣工。

(杨德晖)

maopen

锚喷 (anchoring and shotcrete) 用锚杆和喷射混凝土作为加固岩体或支护围岩的工程措施。根据工程要求和地质条件,锚杆和喷射混凝土有时可单独使用,有时联合使用,有时还要加设钢筋网或用型钢作成的肋形支撑。20世纪60年代以来,锚喷已被广泛采用于地下洞室的围岩支护。锚杆和喷射混凝土层与围岩形成一个承载结构,共同工作,可有效地限制围岩变形的自由发展,调整围岩的应力分布,防止岩体松散坠落。进入70年代,锚喷技术进一步发展,不仅用于地下工程施工的临时支护,也用于永久性衬砌;不仅用于不过水的洞室,也用于有内水压力作用的隧洞;不仅用于尺寸较小的洞室,也用于大跨度、高边墙的洞室中。锚喷也是用新奥地利隧洞施工法的一项主要内容。

锚杆 在岩层中钻孔,设置锚杆,可把松动的岩块固定在稳定的岩层上,或者通过对锚杆的张拉作用,给岩层施加预应力,从而增大节理面或层理面间的摩擦力,提高岩层的整体性和稳定性。通常多采用以钢筋、钢丝绳或高强钢丝束作为杆体材料的金属锚杆,木锚杆和塑料锚杆较少采用。按锚固的型式分机械型锚杆和胶结型锚杆。通过张拉锚杆对岩层施加预应力的称预应力锚杆。

(1) 机械型锚杆主要是依靠深入钻孔内的锚头与孔壁岩石的摩擦力起锚固作用,又分楔缝式、倒楔式和内涨式等。①楔缝式锚杆的锚头是在杆端开一切槽,嵌入楔形块,插至孔底,然后打击锚杆,在楔块作用下使切槽张开,锚头卡紧孔壁。②倒楔式锚杆的锚头有一个斜面,配合一块内小外大的倒楔,用细铁丝捆在一起同时送入孔底,再用撞铁顶住倒楔,敲击撞铁,使倒楔楔紧。③内涨式锚杆有涨壳式和开缝式。涨壳式的锚头是由内侧带有锥形槽的涨壳和具有相应锥度的锥形螺帽组成,旋转锚杆使螺帽张开涨壳,卡紧岩石。开缝式锚管是用空心高强钢管制成的,锚管一端缩小呈锥形以便打入钻孔。锚管壁很薄,直径较钻孔略大,当打入钻孔时,锚管受压产生径向变形和外压力,使锚管对岩层产生摩擦力,从而固定岩层。

(2) 胶结型锚杆主要是依靠胶结材料将杆体锚固

于岩层的钻孔中,又分水泥砂浆锚杆和树脂锚杆。①水泥砂浆锚杆以钢筋作杆体,水泥砂浆作为胶结材料,与围岩联成整体。砂浆锚杆一般采用先向钻孔内注入水泥砂浆,然后插入锚杆的先注后锚法施工,也有的采用插入锚杆后,抽真空再用压力灌浆的先锚后灌法施工。采用楔缝式或倒楔式锚杆时,为防止锈蚀和围岩蠕变导致锚杆松动,也常需对锚孔注满砂浆。②树脂锚杆一般也以钢筋作杆体,用掺入一定填料的合成树脂作粘合剂,把杆体与岩石胶结在一起。这种锚杆的作法是,将不饱和聚脂树脂、填料及加速剂等按一定比例混合,与适量的用玻璃管隔开包装的固化剂共同装在容器内制成树脂药包,与锚杆体一起装入钻孔中,旋转锚杆体,将树脂药包搅碎,使固化剂、树脂、加速剂、填料等均匀混合,发生聚合反应,使树脂胶凝固化。

(3)预应力锚杆是通过张拉锚杆体,对岩层施加预应力,从而起到加固作用。大型预应力锚索首先用于大坝加固加高,以后逐步应用于边坡和地下洞室加固等方面,它是高陡岩质边坡和高大地下洞室围岩加固的一种有效手段。预应力锚索主要由内锚固段、外锚头和锚索体三部分组成。内锚固段也称内锚头,是预应力锚固的根基。常用的内锚头也分机械型和胶结型。外锚头是钻孔孔口实现张拉和锁定的直接支撑件,根据预应力吨位和施工条件,可采用钢筋混凝土锚头或钢锚头。锚索体是联系内外锚头,承受张拉力的构件,用高强钢丝束或钢绞线制成。施工时先将内锚固段固定在钻孔中,再用千斤顶对锚索进行张拉,达到设计预应力吨位以后,加以锁定。为防止钢丝锈蚀,保证锚索长时间工作,需按一定要求对锚孔进行灌浆。

喷射混凝土 通过混凝土喷射机,利用压缩空气将粗细混凝土骨料、水泥、水和外加剂等组成的混合料,喷向岩石或其他受喷面,经凝结硬化成混凝土的施工工艺。喷射的混凝土与岩石紧密胶结,能有效地限制地下洞室中围岩的剥离和松散,调整应力分布,充分利用地层抗力。喷射混凝土的施工方法分干喷法、湿喷法和水泥裹砂法等。在喷射工作面多使用机械手代替人力。

(1)干喷法是将水泥、砂、石和速凝剂等材料,按一定比例配合成混合料,用压缩空气输送到喷头的喷嘴处再加水混合喷出。这种方法用的喷射机结构简单,使用方便,输送距离远,采用的较多。但缺点是粉尘大,回弹率高,质量不易控制。

(2)湿喷法是将水泥、砂、石和水等全部材料先行拌和后再喷射。这一方法可减少粉尘,回弹率低,混凝土质量较好。但缺点是输送距离短,容易堵管。还有一种混合喷射法,在拌料时不加速凝剂,先加少部分水,大部分水和速凝剂一起在喷头处加入混合料中,然后

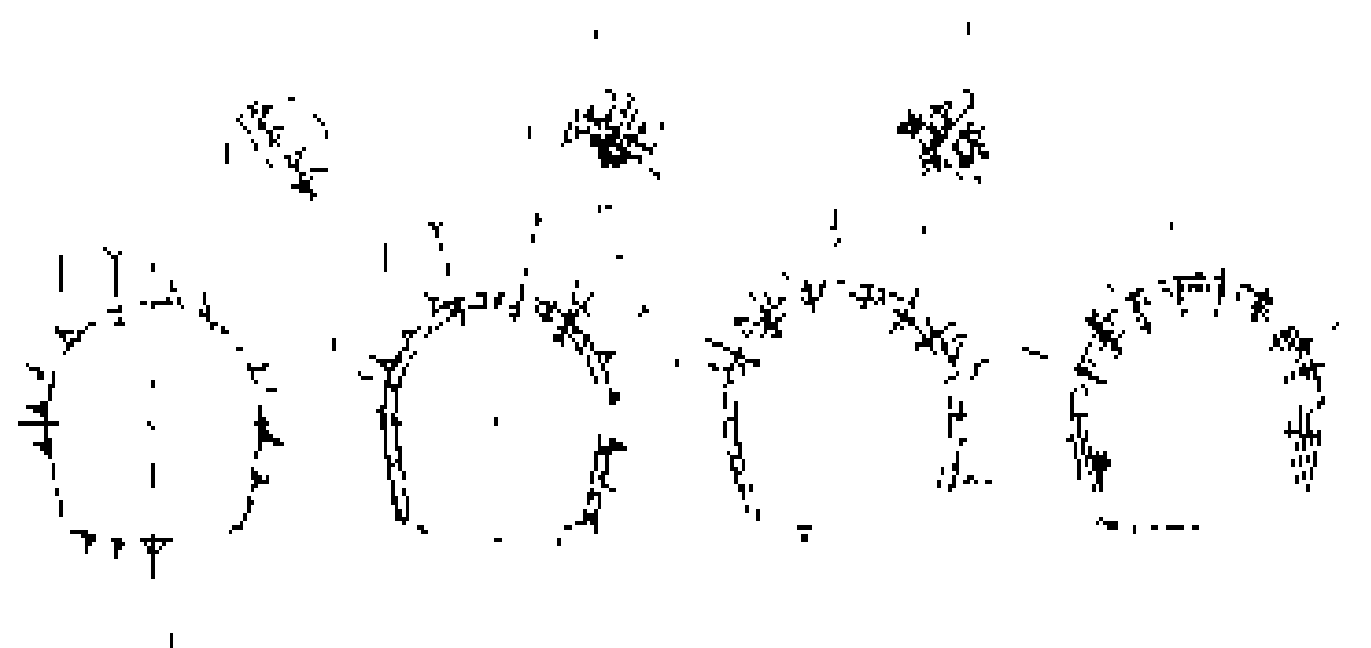
喷射,效果较好。

(3)水泥裹砂法是将砂子调湿到一定含水率,加入全部用量的水泥,经过裹砂机搅拌,使砂粒表面包裹一层低水灰比的水泥浆壳,再加入拌和用水和减水剂制成水泥裹砂砂浆。用这种砂浆与粗骨料、速凝剂等,在喷嘴处混合,无需另外加水,直接喷射。用水泥裹砂法喷射的混凝土质量好,并且粉尘少,回弹率低,节省水泥。

锚喷的应用 在水力发电工程中,锚喷广泛应用于坝基和边坡岩石加固、水工隧洞的施工支护和永久性衬砌以及高大地下洞室的支护加固等方面。

(1)坝基加固。自1934年法国在阿尔及利亚的乞尔法坝加高工程中,成功地应用大型预应力锚固后,这一方法就常用于大坝加高加固、坝基及边坡的抗滑稳定处理。中国于1964年在梅山水库右岸坝头岩基加固中,成功地应用这一技术,单孔预应力吨位最大达324t,随后,又应用于双牌、陈村等许多水电工程。

(2)隧洞支护。锚喷不仅广泛用于隧洞施工作为临时支护,也用于作为永久性衬砌,以代替现浇混凝土。中国于20世纪70年代初,在辽宁回龙山水电站和四川渔子溪一级水电站的引水隧洞中,均采用了锚喷衬砌。根据不同的地质条件,水工隧洞锚喷支护可采用不同的型式。有的采用局部锚杆或局部喷射混凝土(图a);有的采用锚杆结合喷射混凝土(图b);有的采用锚杆结合钢筋网喷射混凝土(图c);有的采用锚喷加设钢筋网并设工字钢支撑(图d)。



水工隧洞锚喷支护型式示意图

(a) 局部采用锚杆或喷射混凝土; (b) 锚杆结合喷射混凝土; (c) 锚杆结合钢筋网喷射混凝土; (d) 锚喷加设钢筋网并设支撑

1—锚杆; 2—喷射混凝土; 3—钢筋网; 4—工字钢支撑

(3)高大地下洞室支护。对于大跨度、高边墙的地下洞室,锚喷支护是有效的措施,可以节省钢筋混凝土工程量,加快工程施工进度,常用于水电站的地下厂房、调压井等。中国碧口水电站的调压井,边墙高79m,岩石强度虽高,但有许多不利的结构面组合,对岩体稳定不利,采用分部开挖、边挖边锚的方法,保证了施工安全。白山水电站的地下厂房开挖跨度25.4m,高54m,长148.5m,顶拱和边墙也采用了系统锚杆、钢筋网和喷射混凝土作为永久支护。

锚喷支护的设计还没有一套完善的、统一的理论和方法。实践中常针对具体工程,根据岩石性质、岩体结构、地下水活动情况等地质条件,首先对围岩进行分类,然后参照已建工程的经验和有关规范,初步选定锚喷参数,再用某种设计理论和计算方法进行验算。

参考书目

水利电力部东北勘测设计院锚喷组主编,地下洞室的锚喷支护,北京:水利电力出版社,1985

(王庭济)

Meiguo shuinneng ziyuan

美国水能资源 (hydropower resources of USA) 美国的技术可能开发资源可装机 146700 MW, 平均年发电量 5294 亿 kW·h; 而经济可开发资源为 3760 亿 kW·h/a。另外阿拉斯加有技术可开发潮汐能资源 185 亿 kW·h/a。

受降水量和地形高差影响,美国水能资源在地区上分布很不均匀。太平洋沿岸和落基山区 11 个州的降水量多、地形高差大,具有占全国 62% 的水能资源;中部 20 个州占 16%;大西洋沿岸 18 个州占 18%;阿拉斯加和夏威夷州占 4%。按流域统计,哥伦比亚河流域的水能资源最丰富,占 36.8%;密西西比河流域占 11.6%;大湖流域占 6.6%;科罗拉多河流域占 4.8%。

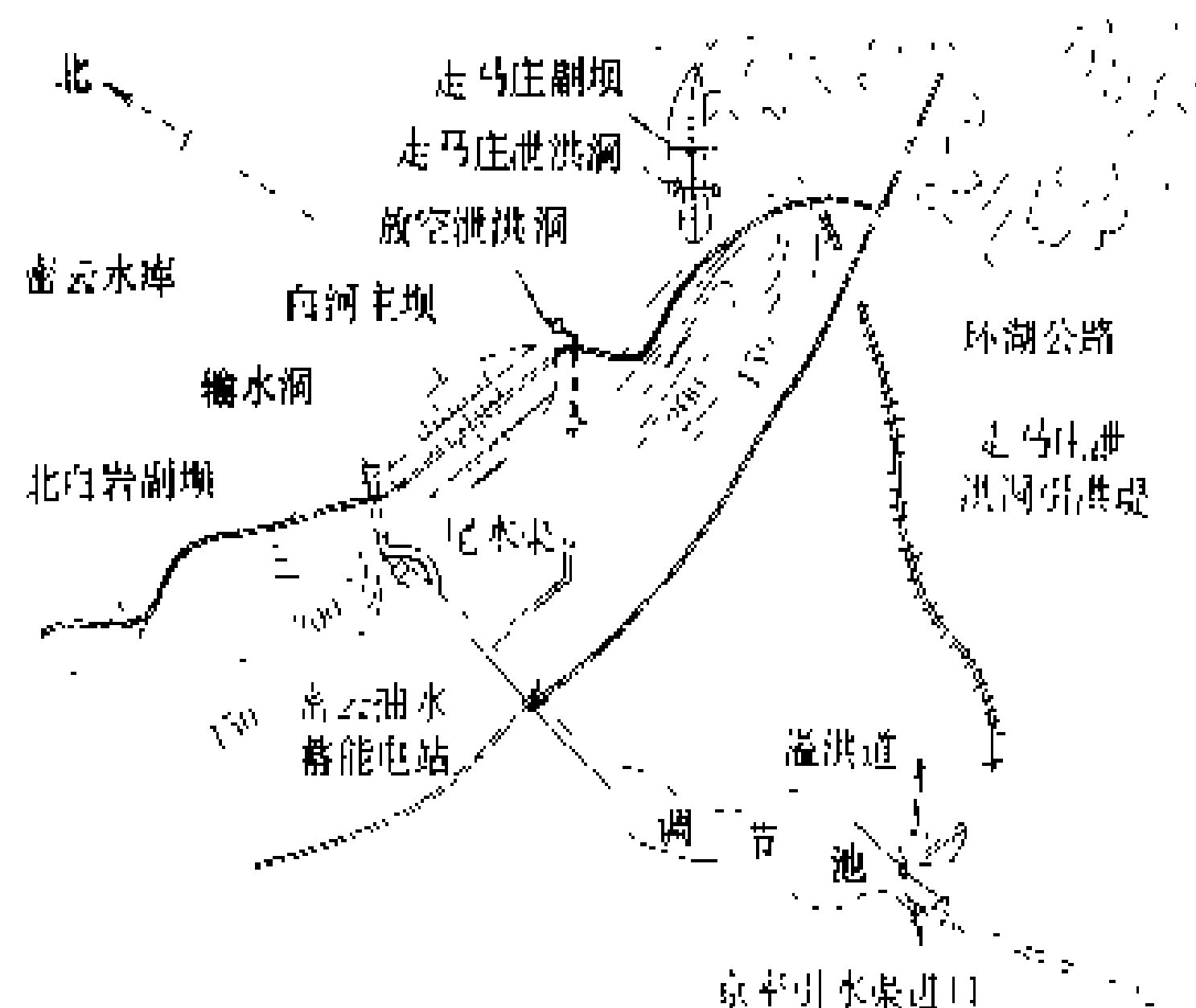
美国是世界上开发利用水能资源比较充分的国家,于 1882 年开始建第一座小水电站,到 1902 年已建水电站装机容量 1370 MW,到 1950 年已建 18675 MW,到 1991 年已建常规水电站 73205 MW,抽水蓄能电站 18091 MW,合计 91296 MW。1991 年水电站年发电量 2755 亿 kW·h,占技术可开发资源的 52.0%,利用程度已很高。已建水电站中规模最大的是哥伦比亚河上的大古力水电站,装机容量 6494 MW。据 1988 年统计,单站装机 250 MW 以上的水电站已建 51 座,占水电总装机的 56%;单站规模 25~250 MW 的中型水电站 313 座,占总装机的 35%;小型水电站 1646 座,占总装机的 9%。

(高又生)

Miyun Choushui Xu'neng Dianzhan

密云抽水蓄能电站 (Miyun Pumped Storage Power Station) 海河流域潮白河水系上的混合式抽水蓄能电站。位于北京市东北,距密云县城 14 km。电站总装机容量为 82 MW,保证出力 8.8 MW,年发电量 1.14 亿 kW·h。通过 3 回 110 kV 输电线路接入京津唐电力系统。抽水蓄能机组可为电力系统增加尖峰出力 60~80 MW。密云水库的主要任务是防洪和向北京市供水,平均每年供水 7.8 亿 m³,并保护下

游农田 600 万亩。工程于 1958 年开工,1975 年完工。电站位置示意图。



密云抽水蓄能电站位置示意图

上水库和下水库 上水库为密云水库。坝址以上流域面积 15788 km²。多年平均年径流量 14.9 亿 m³。水库最高水位设计 159.5 m, 现行 158.5 m, 总库容 43.75 亿 m³; 正常蓄水位 147.5 m, 相应库容 23.38 亿 m³; 死水位 126.0 m, 死库容 4.37 亿 m³, 为多年调节水库。主坝按千年一遇洪水设计, 万年一遇洪水校核。洪峰流量分别为 16500 m³/s 和 23300 m³/s。密云水库由潮河和白河 2 座主坝和 5 座副坝组成。除 1 座副坝系心墙土坝外, 其余皆为碾压式斜墙土坝。白河主坝最大坝高 66.4 m, 坝顶长度 960.2 m。潮河主坝最大坝高 56 m, 坝顶长度 1008 m, 5 座副坝, 共长 2591.3 m, 最高的最大坝高 39 m。

潮河侧库岸设有 3 座溢洪道。第一溢洪道设弧门 5 座, 尺寸为 10 m×6 m; 第二溢洪道设弧门 5 座; 尺寸为 12 m×9 m; 第三溢洪道设弧门 6 座, 尺寸为 12 m×12 m。3 座溢洪道最大总泄洪量 16310 m³/s。潮河黄各庄设输水隧洞 1 条, 内径 4 m, 长 428 m, 最大过水能力 215 m³/s。白河走马庄副坝处设泄洪隧洞 1 条, 内径 6 m, 长 137 m, 最大泄洪量 474 m³/s。白河主坝左坝肩设放空泄洪洞 1 条, 泄洪量为 110 m³/s。白河和潮河还分别设有引水泄洪洞 1 条, 可引泄 724 m³/s。

下水库按 2 台机组抽水 12 h 水量设计, 调节库容 210 万 m³。正常水位 93.5 m, 相应库容 470 万 m³。最高水位 94.9 m, 相应库容 505 万 m³。最低水位 90.5 m, 相应库容 250 万 m³。库内以预制混凝土方砖衬砌。

引水系统 白河引水隧洞位于白河主坝右坝肩, 向白河厂房机组输水, 洞径 6 m, 长 441 m。进水口底坎高程 116.0 m, 设斜卧支墩式进水塔。隧洞末端设有阻抗式调压井, 井底高程 119.5 m, 顶高程 166.5 m, 井内径 18 m, 上室内径 26 m。井后分 2 支高压管道, 管径 5.5 m。每管又分 3 根岔管进入厂房, 管长 160~

185 m, 接常规机组的 2 根管径 3.4 m, 接抽水蓄能机组的 1 根管径 2.6 m。

厂房 主厂房长 90.64 m, 宽 16.26 m, 高 31.5 m, 装有常规混流式水轮发电机组 4 台, 单机容量 15 MW; 装有抽水蓄能机组 2 台, 单机容量 11 MW。

机电设备 4 台常规机组: 混流式水轮机, 转轮直径 2.25 m, 额定水头 46.5 m, 设计流量 38.3 m³/s; 发电机额定容量 15 MW。

2 台抽水蓄能机组。水泵水轮机为斜流可逆式, 转轮直径 2.5 m。水泵工况, 转速 250/273 r/min, 最大扬程 59 m, 设计扬程 52 m, 最小场程 31 m, 相应输入功率分别为 15 MW, 13.5 MW 和 5.25 MW; 相应流量分别为 22.3 m³/s, 23.6 m³/s 和 14.3 m³/s, 最大效率 89.86%。水轮机工况, 最大水头 64 m, 额定水头 46 m, 最小水头 28 m, 最大效率 90.2%, 输出功率 11 MW。发电电动机: 发电机工况时, 额定容量 15 MV·A, 额定电压 10.5 kV, 额定电流 825 A, 额定功率因数 0.85, 额定转速 250 r/min; 电动机工况时, 额定功率 15/13.5 MW, 额定电流 905/825 A, 转速 273/250 r/min; 采用晶闸管静止式励磁装置。水泵启动采用半电压启动方式。

设计和施工单位 清华大学水利系设计, 密云水库修建总指挥部施工。

(杨承沪)

Min Jiang shuixi shuinneng ziyuan

闽江水系水能资源 (hydropower resources of Minjiang river system) 据 1980 年《中华人民共和国水力资源普查成果》统计闽江水系理论蕴藏量为 562.22 亿 kW·h/a, 占中国的 0.95%; 其中可能开发资源 (见水能资源) 207.16 亿 kW·h/a, 占中国的 1.1%。闽江流域雨量充沛, 河流陡峻, 干支流的水能资源都较丰富。支流的理论蕴藏量 432.81 亿 kW·h/a, 占全水系的 77.03%; 可能开发资源 130.59 亿 kW·h/a, 占水系的 63.04%。

闽江为福建省的第一大江, 流域面积 6.1 万 km²。南平以上有 3 大河流: 北有建溪, 西北有富屯溪, 西南有沙溪。其中以沙溪河道最长, 习惯上以其作为干流。南平市以下始称闽江。干流长 581 km, 落差 730 m, 多年平均年径流量 620 亿 m³。

闽江水系支流众多, 水能理论蕴藏量 1 万 kW 以上的各级支流有 64 条, 且径流充沛, 因而水能资源丰富。干流 (包括上游的沙溪) 水能理论蕴藏量 129.41 亿 kW·h/a, 占全水系的 22.97%。可能开发水能资源总装机容量 196.63 万 kW, 平均年发电量 76.57 亿 kW·h, 分别占全水系的 42.11% 和 36.96%。全水系

装机容量最大的水电站为干流上的水口水电站, 装机容量 140 万 kW, 约为全水系的 30%。梯级水电站总装机容量 10 万 kW 以上的支流有富屯溪及其支流金溪, 建溪及其支流南浦溪、松溪、尤溪、古田溪、大樟溪等 8 条河流。上述 8 条支流可能开发水能资源总装机容量 188.11 万 kW, 平均年发电量 93.77 亿 kW·h, 分别占全流域的 40.28% 和 45.26%, 亦为福建省重点开发的河流。其他支流只能兴建小型水电站和农村小型水电站。

闽江水系水能资源已开发的主要有古田溪梯级 (共 4 座水电站, 总装机容量 25.9 万 kW, 平均年发电量 10.62 亿 kW·h) 和干流的安砂、鸭母潭、沙溪口和金溪的池潭等。闽江水系最大的水电站水口水电站已开工兴建。

(赵毓崑)

Minghu Choushui Xu'neng Dianzhan

明湖抽水蓄能电站 (Minghu Pumped Storage Power Station)

位于台湾省中部的日月潭风景区, 装机容量 1000 MW, 以 345 kV 超高压输电线路接入台湾电力系统, 担负系统填谷调峰任务, 增加系统备用容量, 提高系统的运行可靠性和灵活性。工程于 1981 年 4 月开工, 1985 年 1 月第一台机组投运发电, 同年 8 月竣工。工程总布置见图。

上水库和下水库 利用已建日月潭水库为上水库。日月潭原为天然湖泊, 自相邻流域引入流量 41 m³/s。上水库建有 2 座混凝土心墙土坝, 高度分别为 19 m 和 22 m, 长度分别为 300 m 和 150 m。水库最高水位 748.48 m, 最低水位 727.50 m, 调节库容 1.424 亿 m³。高水位时, 日水位变动最大幅度 1.2 m。

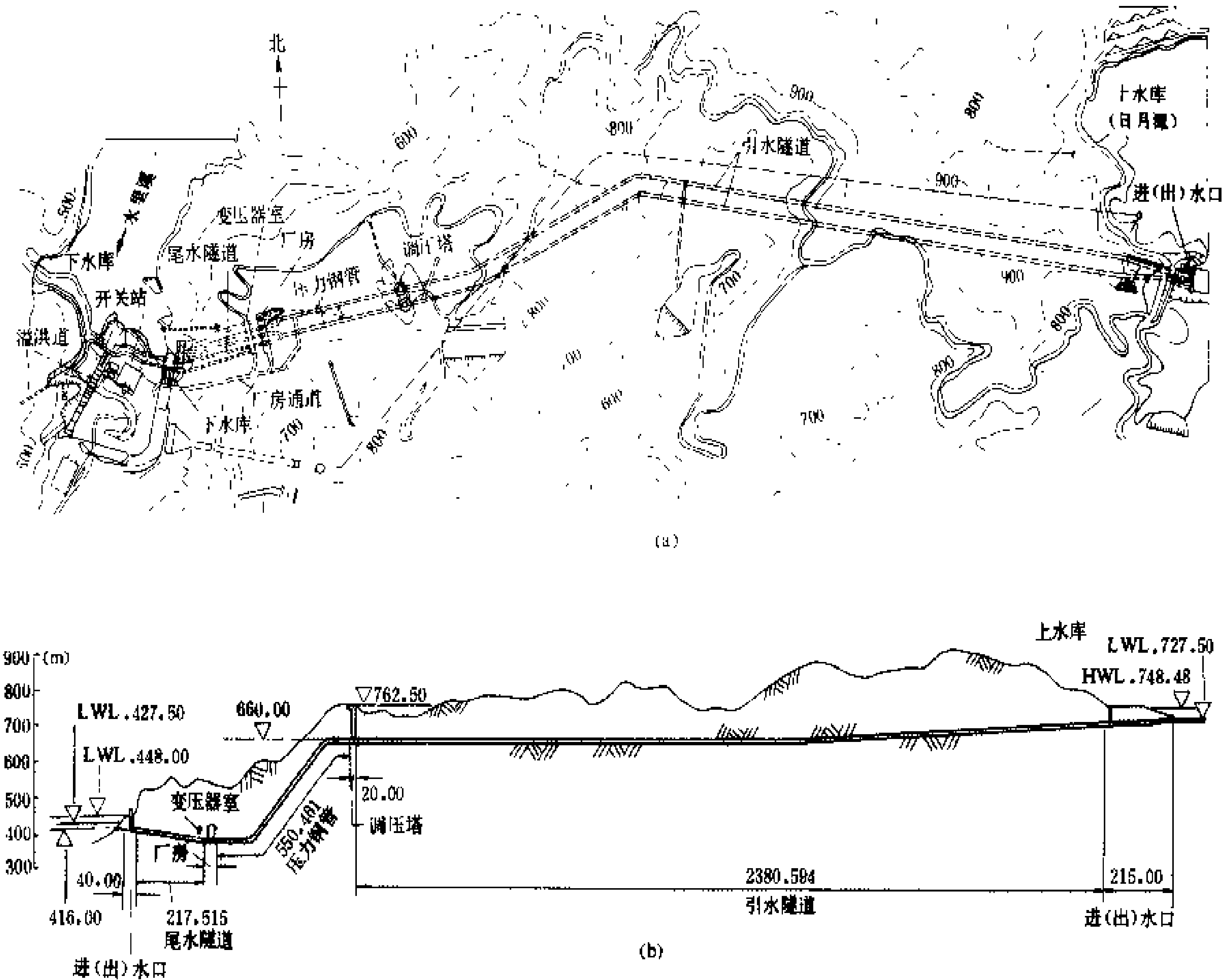
在水里溪上修建一座混凝土重力坝壅高水位形成下水库。坝址上游流域面积 37 km²。水库最高蓄水位 488 m, 相应库容 920 万 m³, 最低蓄水位 427.5 m, 调节库容 740 万 m³, 消落深度 20.5 m。混凝土坝坝顶高程 450.5 m, 坝高 57.5 m, 顶长 169.5 m。坝下设有 2 条冲沙泄水道, 断面尺寸 4 m×4 m, 底部高程 404 m。设有 1 条岸边溢洪道, 总长 224 m, 渠宽 22~15 m, 设 2 孔闸门, 每孔尺寸为 10 m (宽)×11.6 m (高)。

引水系统 进水口位于上库西岸, 由喇叭形取水口、渐变段隧洞及闸门井 3 部分组成, 进口底坎高程 718 m。2 条引水隧洞为圆形断面, 直径 7 m, 中心距 50 m, 分别长 2380.6 m 和 2350.7 m。隧洞末端各设 1 座阻抗式调压井, 由直径 12 m 高 86.5 m 的竖井和顶部直径 30 m 高 12.5 m 的上室组成。调压井后, 分出 2 条高压管道, 内径由 7 m 渐变为 5.8 m, 分别长 550 m 和 560 m。然后再分岔为 4 条支管, 内径由 4 m

渐变至 2.7 m。

地下厂房 地下厂房长 127.2 m，宽 21.2 m，高 45.5 m，位于水里溪左岸山体内部。安装 4 台可逆式水轮发电机组。主变压器洞室长 104 m，宽 13 m，高 14.4 m，其洞轴线与主厂房中心线平行，位于厂房中心线下游 45 m 处。4 条尾水隧洞均为圆形断面，内径 5.5 m，洞长 218~233 m。

机电设备 4 台抽水蓄能机组由竖轴混流可逆式水泵水轮机和竖轴半伞式三相交流同期发电电动机组成，单机容量 250 MW。水泵水轮机的水轮机工况，最



明湖抽水蓄能电站工程总布置图
(a) 平面布置；(b) 水路纵剖面

大净水头 316.5 m，最小净水头 269.5 m，最大流量 95 m³/s；水泵工况，最大扬程 326 m，最小扬程 283 m，最大抽水流量 82 m³/s，最大输入功率 265 MW。水泵水轮机转速为 300 r/min，吸出高度为 -38 m。发电电动机的额定发电容量为 280 MV·A，频率 60 Hz，电压 16.5 kV。电动机起动方式，1 号和 3 号机采用辅助电动机起动，2 号和 4 号机采用背靠背同步起动方式。

4 台屋内特殊式三相变压器，电压为 16.5 kV/345 kV，单台容量 480 MV·A。高压配电装置采用 345 kV，屋外型气体绝缘断路器。

建设单位 台湾电力公司。

(熊思政)

mingqu buhengdingliu

明渠不恒定流 (unsteady flow in open cha-

nnel) 渠道或天然河道各断面的流速(或流量)和水深(或水位)随时间(*t*)及地点(*S*)而变化的水流运动。亦称明渠非恒定流。河道中洪水波传播、水电站日调节下游河道流态、河口潮汐流动、堤坝溃决时的水流运动皆为明渠不恒定流。

明渠不恒定流属于水动力学中的波动，其特点是波形平缓， $L/h > 20$ (L 为波长， h 为水深)，水深相对较浅，水的质点有平面移动，称为浅水移动长波。当波动变化过程缓慢、瞬时水面坡度很小、流线近于平行的直线时为连续波，其水力因素(水深、流量、流速等)是时间和地点的连续函数，称为渐变不恒定流，如河道洪水波及水电站日调节不恒定流。当波动变化过程迅速、断面上的水深和流速急剧变化、局部瞬时水面线坡度很陡甚至形成阶梯状时，其水力因素不是时间和地点的连续函数，则为不连续波或立波，称为急变不恒定

流。如溃坝坡或水体突然泄放。

明渠不恒定流研究始于 18 世纪。1788 年 J.L. 拉格朗日 (J. L. Lagrange) 创立浅水波理论。1871 年法国 D. 圣维南 (De Saint Venant) 根据质量守恒与动量守恒原理提出一维渐变不恒定流方程组

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial Q}{\partial S} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\text{动量方程} \quad i - \frac{\partial h}{\partial S} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial S} + \frac{V^2}{C^2 R}$$

式中 Q 为流量; A 为过水面积; S 为距离; t 为时间; i 为河段底坡; h 为水深; V 为断面平均流速; C 为谢才系数; R 为水力半径; q 为区间入流量。

明渠不恒定流的研究方法有水力模型法和数值计算法等。目前解决一维不恒定流问题多用数值计算法。圣维南方程组为一阶拟线性双曲型偏微分方程, 难于直接求解。工程规划设计一般用特征差分或直接差分等数值计算法求解。直接差分法又分为显式差分法与隐式差分法两类。显式差分法假定时段末瞬流态的沿程变率用时段初瞬值代替, 流态时间变率用流段中断面数值表示, 方程中非偏导数因子以时段初瞬流段中断面数值代入, 因此可根据前一瞬时各点的已知量逐点分别求解下一瞬时的未知量, 计算较简便。当时间步长 Δt 与距离步长 ΔS 足够小时这种假定引起的误差是很小的。隐式差分法不作上述假定, 而是联解 n 个差分方程, 同时求出下一瞬时各点的未知量, 计算工作量较大。隐式差分法的稳定性比显式差分法好, 近年来应用范围较广。当水力因素随时间和地点变化比较缓慢时, 不恒定流问题(如洪水传播)可采用忽略圣维南方程组的惯性项与流速水头项的简化法, 如瞬态法或简化差分法。

方程组的求解除需要纵横断面及糙率资料外, 还需给定起始条件和边界条件。起始条件为计算初瞬河道沿程的水深(或水位)和流速(或流量)状态的数据。边界条件为河段两端断面的流量过程、水位过程或水位流量关系数值。

对河口潮汐水流及平原洪泛区洪水演进, 除需了解沿主流方向的流速及水深外, 尚需研究横向水流扩散、回流及两岸淹没范围和水深等, 因此需按二维不恒定流方程组用有限元等数值计算法求解。水力模型试验也是解决二维不恒定流的有效方法。

(唐友一)

mingqu shuixue

明渠水力学 (open channel hydraulics)

研究重力作用下具有自由面的河渠水流运动规律, 是水力学的分支学科。明渠水流的特点是具有自由水面。

明渠水力学是研究当上游来流量变化或河渠断面形状、边壁糙度和渠底坡度变化, 或下游控制条件改变, 以及其他外来扰动加之于水面时, 明渠内形成的各种形式的水面线(水深)及断面流速。

明渠包括棱柱形断面的人工渠道和非棱柱形的天然河道。明渠水流分为两大类: ①水力因素(水深、流速、比降等)不随时间面变化的为明渠恒定流(亦称定常流); ②水力因素随时间面变化的为明渠不恒定流(亦称非定常流)。

明渠恒定流 分为两类: ①水力因素沿程不变的为恒定均匀流; ②水力因素沿程变化的为恒定非均匀流。

(1) 恒定均匀流。水力因素不随时间和沿程而改变。常用 A. 谢才 (A. Chezy) 公式表达

$$v = C \sqrt{RJ}$$

式中 V 为流速, m/s; C 为谢才系数, 常用曼宁 (Manning) 公式表示

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

式中 λ 为阻力系数; n 为边壁糙率系数; J 为能坡(等于明渠底坡 i); R 为水力半径, m。

(2) 恒定非均匀流。水力因素不随时间变化, 但随沿程变化, 又分为渐变流和急变流两种。①恒定渐变流能量方程式为

$$i dS = \cos \theta dh + d \left(\frac{dv^2}{2g} \right) + dh_t + dh_l$$

式中沿程水头损失 h_t 可借用均匀流的谢才关系式; 局部水头损失 $h_l = \Sigma \zeta \frac{v^2}{2g}$ ($\Sigma \zeta$ 为损失系数); θ 为坡角。由

上式导得明渠渐变流水深的沿程变化为

$$\frac{dh}{dS} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2} + (a + \Sigma \zeta) \frac{Q^2}{gA^3} \left(\frac{\partial A}{\partial B} \times \frac{dB}{dS} \right)}{\cos \theta - (a + \Sigma \zeta) \frac{Q^2 B}{gA^3}}$$

式中 S 为沿程距离, m; Q 为流量, m^3/s ; A 为过水断面面积, m^2 ; B 为过水断面水面宽度, m; $K = AC \sqrt{R}$

为明渠流量模数; $J_t = \frac{dh_t}{dS}$ 为沿程阻力坡降。②恒定急变流。

常见的明渠过渡流态有: 从缓流到急流的过渡(如跌水、堰流等); 从急流到缓流的过渡(如水跃); 变宽度河渠中的流动; 弯道水流(急流时可见冲击波)等。明渠急变流常是三维流动, 伴有明显的能量损失, 宜用动量原理或通过模型试验解决。

明渠不恒定流 天然河渠中的水流几乎都是时间上不恒定和空间上非均匀的流动, 如: 暴雨形成的径流; 河渠中洪水波运动(伴有河床冲淤变化的洪水演进

问题);堤坝失事后的溃坝波;库岸或江岸滑坡激起的涌浪;海滨的潮汐、海啸;水电站或水泵站启闭过程中,上下游引水渠中水位、流量的变化;通航建筑物及灌溉系统充泄水时变水头出流都属明渠不恒定流。(见河道不恒定流)

参考书目

Chow Ven-Te. Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Co, 1959

清华大学水力学教研组. 水力学. 北京: 高等教育出版社, 1981

(时启燧)

Mingtian Choushui Xu'nerg Dianzhan

明潭抽水蓄能电站 (Mingtian Pumped Storage Power Station) 位于台湾省中部日月潭西岸,总装机容量1600MW。担负电力系统削峰填谷任务,工程总布置见图。工程于1987年9月动工,计划1993年完成。

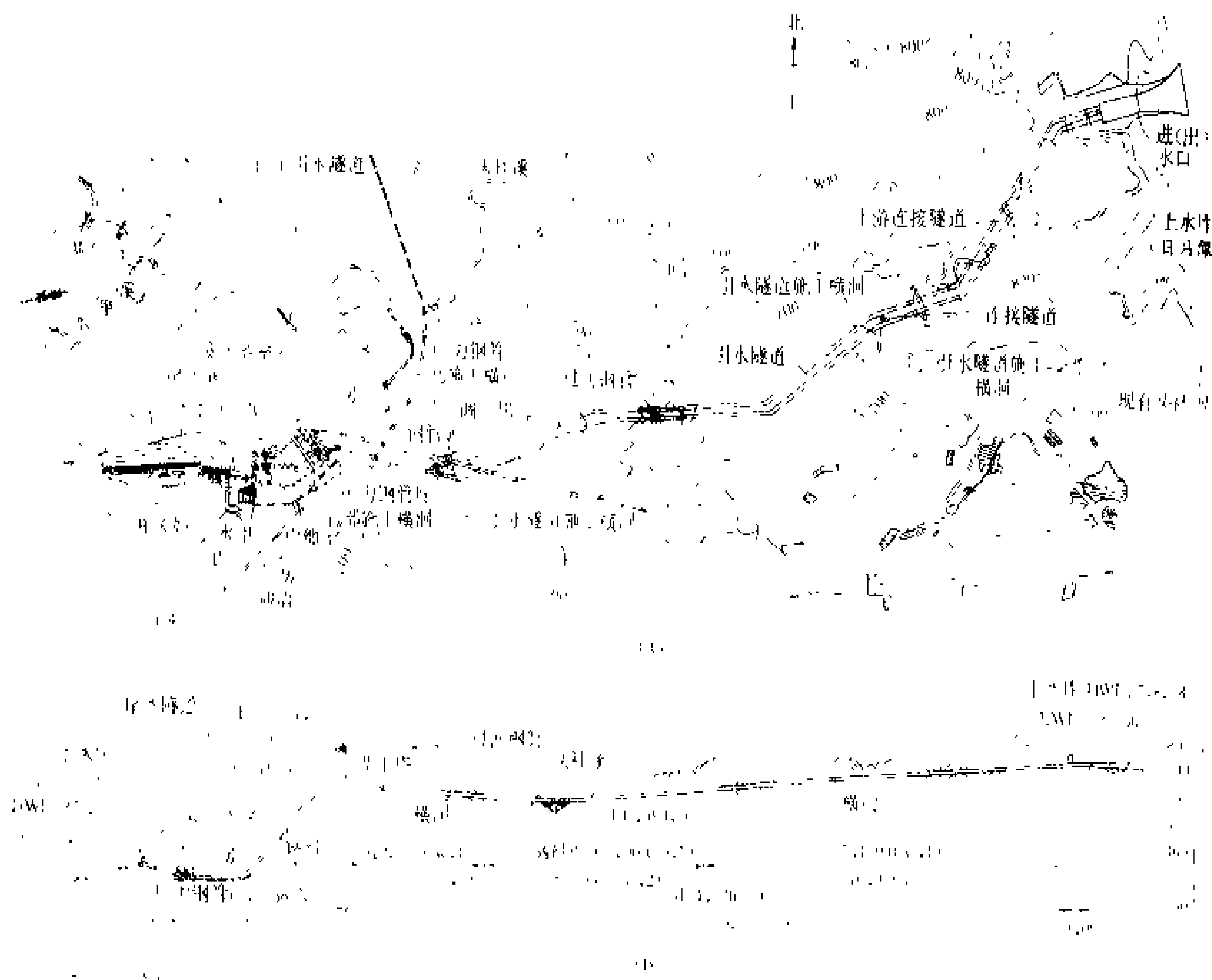
上水库和下水库 以日月潭为上水库。最高水位748.48 m,最低水位727.50 m,调节库容1.424亿 m^3 。高水位时每日水位变动最大幅度1.2 m。(见明湖抽水

蓄能电站)

下水库在明湖抽水蓄能电站下水库下游约4 km的车埕村附近。最高水位373.0 m,最低水位345.0 m,库容1200万 m^3 ,每日水位最大变动幅度28 m。下水库坝修建在水里溪谷口,为混凝土重力坝,坝高61.5 m,顶长314 m。坝底设有4条排沙道,坝上设有3条表孔溢洪道,总泄洪量2500 m^3/s 。

上游引水系统 进水口设于日月潭西岸,位于明湖抽水蓄能电站进水口南约1 km处,由引水渠,钢筋混凝土结构和闸门竖井组成。闸门底坎高程715 m,门宽55.4 m。发电引水流量492 m^3/s ,抽水输水流量426 m^3/s 。2条引水隧洞,直径7.5 m,长度分别为3104 m和3169 m,用钢筋混凝土衬砌。隧洞下游端设直井阻抗式调压井。直井直径14 m,高150.2 m。上室直径27 m,高15 m。最高涌浪高程784.89 m,最低涌浪高程653.83 m。调压井后接2条压力钢管,直径由6.8 m渐变为2.78 m。钢管设置在倾角为48°的斜井内,长度分别为814 m和704 m。每条再分为3支岔管,进入厂房。

厂房和开关站 厂房位于下库坝左岸山体内,洞室为马蹄形断面,宽20 m,高46 m,洞长156 m。变



明潭抽水蓄能电站工程总布置图
(a) 工程总布置图; (b) 水路纵剖面图



压器室洞与厂房洞平行,长169 m,宽12 m,高18 m。屋外开关站位于下水库右岸,场地长100 m,宽50 m。

尾水输水系统 有压尾水隧洞6条,圆形断面,直径5 m,长154~223 m。出水口位于下水库坝左岸下游约10 km处,为钢筋混凝土结构,宽90 m,高7.95 m,底坎高程335.55 m。设有6扇宽4 m,高5 m的平面闸门。

机电设备 混流式水泵水轮机6台,额定水头380 m时,额定转速400 r/min。抽水工况单机最大输入功率280 MW,抽水流量71 m³/s,发电工况单机最大出力275 MW。6台半伞式抽水蓄能发电电动机,额定参数为:电压16.5 kV;转速400 r/min;发电容量300 MV·A,功率因数0.9;电动机功率283 MW。电动机起动采用静止式变频装置和背靠背同步两种方式。

6台屋内特殊式三相变压器,单台容量300 MV·A,额定电压16.5/345 kV。

断路器为345kV气体绝缘屋外型断路器。

造价 总造价为新台币50.8亿元,投资回收年限为14.91年。

(杨德晖)

muban

模板 (form) 在混凝土工程施工中,用以控制混凝土拌和物,使之按要求成型的构造设施。模板构造一般包括面板和支承体系两个主要部分。面板与混凝土直接接触以控制结构物体型。支承体系则包括用以固定面板和支承结构的梁、柱、桁架、斜撑、拉条以及纵横带等联系杆体。模板的制作、安装、使用和拆除,是混凝土施工中的重要工序,它对于混凝土工程的造价和施工速度有较大的影响。对模板的要求是:①保证混凝土结构物的形状、尺寸与相互位置的正确性。②具有足够的强度、刚度和稳定性,能可靠地承受施工过程中各种载荷。③表面光洁平整,接缝严密,不漏浆。④尽量做到定型和系列化,拆装方便,可多次周转,并有利于混凝土工程的机械化施工。

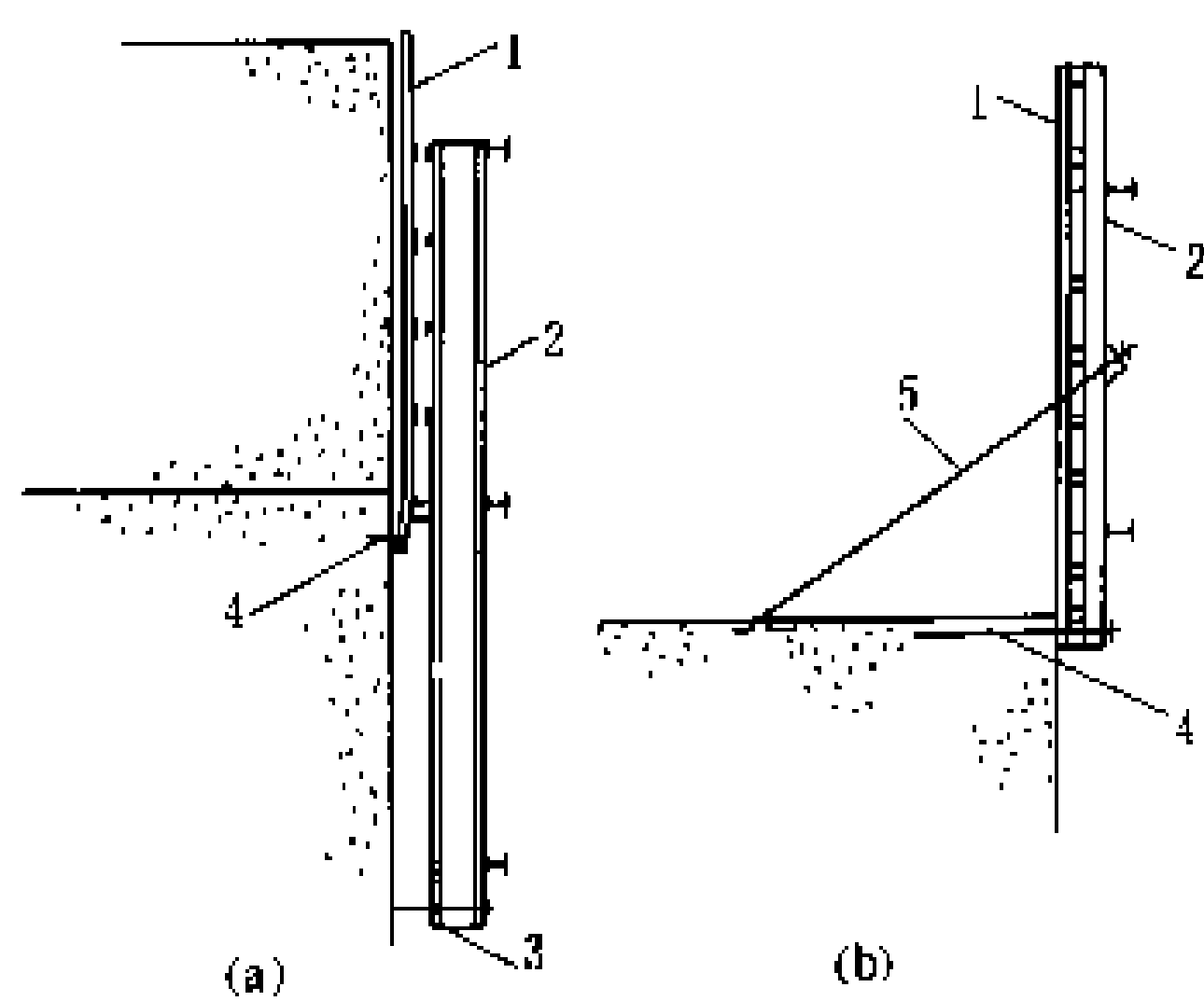
模板的类型①按所采用的材料分,有木模板、钢模板、钢木混合模板、混凝土模板、塑料模板等。②按模板受力状态分,有只承受混凝土拌和物侧压力的非承重模板和承受混凝土重力的承重模板。③按结构支承形式分,有靠支撑、拉条保持稳定的普通模板,有靠悬臂梁或桁架保持稳定的悬臂模板、半悬臂模板,有靠自重保持稳定的重力式模板,还有靠钢筋骨架承重的模板。④按模板拆移方式分,除普通模板外,还有滑动模板、自升模板、钢模台车、针梁模板等。⑤按模板功能分,除普通模板外,还有真空模板、保温模板、电热模板以及用于离心浇筑的旋转模板等。此外,有用砌砖或

土模作为成型的构造设施的。

水力发电工程除与工业民用建筑采用相同的普通模板外,常采用大型模板、悬臂模板、预制混凝土模板、滑动模板和用于隧洞施工的专用模板等。

(1)大型模板。这是在水电工程特别是大坝施工中广泛使用的模板。一般高3~6 m,宽6~10 m,多采用钢木混合模板。用大型模板代替在现场临时拼装的小型模板,可充分利用施工机械,加快立模速度,增加周转次数。20世纪70年代以后,在中国广泛使用定型组合钢模板,用具有一定比例模数的拼块式系列定型模板,组合成各种形状及面积的模板。

(2)悬臂模板。它是以支承在已浇的混凝土上的悬臂钢梁或桁架承受和传递混凝土的侧压力,可以不用拉条,适于在仓内用机械进行混凝土施工,并且模板拆装快,周转次数多,广泛用于大中型混凝土坝工程[图中(a)]。有时在模板的腰部设有拉条,只是拉条以上的模板靠悬臂受力的,称半悬臂模板[图中(b)]。还有一种在悬臂模板的基础上发展起来的自升模板,它是在悬臂模板的背后设有提升柱和提升机构,利用提升柱使模板自行提升。美国在德沃夏克坝(Dworshak)和苏联在托克托古尔坝(Токтогуль)施工中,均采用了自升模板。



悬臂模板和半悬臂模板示意图

(a) 悬臂模板; (b) 半悬臂模板

1 面板; 2 钢梁; 3 支承杆; 4 预埋螺栓; 5 拉条

(3)预制混凝土模板。在工厂中或现场就地预制的混凝土或钢筋混凝土模板。这种模板一般不再拆除,即作为结构物的表面部分。较常用的有:①重力式混凝土模板,依靠自重保持稳定,用于大坝表面。②钢筋混凝土承重模板,用于底孔顶板或结构物的倒悬部分。③异形模板,用于结构形状比较特殊的部位,如坝内廊道、排水井以及其他孔洞等处。

(4)滑动模板。借助机械牵引,随着混凝土浇筑逐步滑动的模板。采用滑动模板可以连续浇筑,模板滑动方向可以是垂直的,也可以是倾斜或水平的。在水电工

程中，它常用于调压井、闸门井、闸墩、隧洞衬砌、溢洪道、大坝溢流面等混凝土工程及混凝土面板堆石坝面板的施工。

(5)隧洞用模板。隧洞混凝土衬砌除可用普通模板或滑动模板外，还可用钢模台车或其他专用设备。钢模台车是由钢模板和可移动的车架组成的专用设备，模

板以车架为支承进行装拆，台车可在轨道或已浇好的混凝土上行驶。中国鲁布革水电站在引水隧洞施工中，使用针梁模板。这种设备无需铺设轨道，模板的撑开、收缩和移动，依靠一根长 38m 从模板中伸出的针梁，适用于隧洞全断面衬砌。

(王庭济)

N

nisha ceyan

泥沙测验 (sediment measurement) 对河流中随水流运动的泥沙数量和变化过程的直接观测,是水文测验的一个主要项目。泥沙资料是水资源开发、利用和管理的基本资料,也是进行泥沙科学研究的重要依据。泥沙测验的内容包括悬移质泥沙测验、推移质泥沙测验、河床质(河床的泥沙,也称床沙)测验和泥沙颗粒分析。

悬移质泥沙测验 包括断面输沙率测验(简称断沙)和单样含沙量测验(简称单沙)。断沙测验目的是为准确推求断面平均含沙量,测次主要布置在洪水时期,以能求得用作准确推算输沙量的单沙和断沙关系曲线为原则。断面上采样垂线数目和位置要能控制含沙量的横向变化。在垂线上采取水样的方法有积点法、定比混合法和积深法等。单沙含沙量测验取样位置一般要通过输沙率测验资料分析选定。在所选位置上测得的单沙要能在较长时段内和断沙具有良好的相关关系,且取样简便。单沙测次要能控制含沙量变化过程,准确推算出全年逐日平均输沙率。悬移质测验常用的仪器有瞬时式和积时式两种。瞬时式主要有横式采样器,其优点是结构简单,应用范围广,但只能求得瞬时水样,代表性差。积时式采样器有积点式和积深式两种,常用的有瓶式、调压式、抽气式等。此外应用同位素测沙仪可以连续自动记录含沙量,但是当需作颗粒分析时,仍要用采样器取样。由于悬移质采样器取不到临河底沙样,要结合实验资料作修正。

推移质泥沙测验 包括测定每秒通过测沙断面的推移质数量,并通过与其它水文要素寻求关系,推算出推移质输沙量。当前主要采用器测法。仪器的性能原则上要求能取得在各种条件下(如不同水深、流速、颗粒级配等)不受扰动或扰动轻微的推移质沙样。沙质推移质采样器主要为匣式,卵石推移质采样器主要为网式,有软底、硬底两种。仪器放置于床面,大多改变了水流结构,因而实测成果不能完全反映天然实际情况,要根据实验资料进行修正。利用单宽推移质输沙率(简称单推)与推移质断面输沙率(简称断推)的关系,推求年、

月输沙量的测站,断推测次视单推和断推的关系是否良好而定。单推测次以能控制推移质输沙率变化过程,满足推算年、月输沙量需要为原则。全年测次主要分布在洪水期。推移质输沙率取样垂线位置尽可能与悬移质输沙率垂线重合,并宜和悬移质输沙率、流量、河床质测验同时进行,以便于资料分析和整理。为消除脉动影响,每条垂线要重复取样2~3次。

推移质测验除器测法外,还有坑测法、沙波法。坑测法是设置前沿垂直于水流、顶部与河床齐平的带盖的坑。施测时,将盖打开后,收集推移质,定时从坑内取出泥沙,计算推移质输沙率。沙波法适用于推移质以明显沙波形式运动的河流,在一个河段内精密测定沙波的运动过程来推算输沙率。

河床质测验 包括采取测验断面的河床质泥沙并进行颗粒分析。为分析研究悬移质含沙量和推移质输沙率的断面横向变化、河床冲淤变化、河床糙率以及利用公式推算推移质输沙率等提供基本资料。对采样器的基本要求是能取得河床表层0.1~0.2 m以内的沙样,仪器上提时器内沙样不流失。目前沙质河床的采样器有圆锥式、钻式、悬锤式等,卵石河床的采样器有锹式、蚌式等。河床质测验一般与悬移质和推移质泥沙测验中作颗分的测次同时进行,在施测推移质和悬移质输沙率的垂线上取样。每个沙样的沙重应满足颗粒分析要求。

泥沙颗粒分析 测定沙样中各种粒径泥沙重量占沙样总重的百分比,据此绘出的曲线图为颗粒级配曲线。分析方法应按泥沙粒径和水样沙重选用不同的方法。对于大卵石可用卡尺测量,粒径介于0.1~100 mm范围用筛分析法。粒径小于0.1 mm的泥沙用间接方法测定,即通过测定泥沙在水体中沉降速度,根据沉速与粒径关系求得粒径,一般应用方法有粒径计法、比重计法、移液管法、消光法(或称光电法)等。粒径计是一个直径4 cm、长110 cm的直立玻璃管,底部收缩,有开关。操作时,上部加沙后塞紧,打开底部开关,用小杯按规定时间接取各粒径组的泥沙烘干称重,可求得泥沙级配。粒径计法操作简便,20世纪60~70年代应用较广,但分析成果,泥沙颗粒偏粗。移液管法、比重计法及消光法的基本原理相同,即开始时让泥沙在水柱中混匀,随着泥沙的沉降,在某一深度处,经过一定时间,超过某一粒径的颗粒将全部沉降至此深度以下,而小于此粒径的颗粒浓度仍保持初始值,通过测量某深度处泥沙浓度的变化,可得到泥沙级配资料。

(庄德桢)

nisha chenjiang sudu

泥沙沉降速度 (sediment settling velocity)



单颗粒泥沙在静止的清水中等速下沉时的速度。泥沙颗粒在静水中下沉时，其运动状态与沙粒雷诺数 $Re_d = \omega d / \nu$ 有关，式中 ν 为水的运动粘滞性系数； d 及 ω 分别为泥沙的粒径，mm 与沉速，m/s。

当 $Re_d < 0.5$ 时，沉降运动属层流状态，泥沙沉速可以用下式计算

$$\omega = \frac{(\gamma_s - \gamma)d^2}{18\mu}$$

式中 μ 为水的动力粘滞系数； γ_s, γ 分别为泥沙及水的重率，kg/m³。

当 $Re_d > 1000$ 时，运动属紊流状态， ω 用下式求得

$$\omega = 1.72 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d}$$

过渡区目前尚无理论解，不同学者曾提出一些半经验性公式。影响泥沙沉速的主要因素有：泥沙颗粒的形状、水质及含沙量等。试验的结果表明，即使在层流状态下泥沙颗粒的几何形态对沉速的影响也是明显的，而且颗粒愈粗（粒石、卵石等）影响愈大。水质主要表现在对 $d < (0.01 \sim 0.02)$ mm 的细颗粒泥沙有影响。在一般河水中，这样的细颗粒往往并非单颗粒下沉，而是产生絮凝现象（细颗粒泥沙之间由于吸附水膜的作用及水和泥沙的电化学性质的作用而结合成一集合体的现象），结成一团下沉，其下沉速度远大于单颗粒泥沙的沉速。含沙量对沉速的影响十分复杂，它不仅与含沙量的高低有关，而且与泥沙颗粒的粗细有关。对于处在分散状态的粗颗粒泥沙，由于不存在絮凝现象，当含沙量逐渐增大时，沉速将因泥沙下沉时诱发的向上水流的影响而逐渐减小。对于细颗粒泥沙，则因絮凝作用，沉速将从清水单颗粒开始，逐渐增大；但当沉速达到一个峰值后，又因浑水粘滞性的加大而使沉速再度减小。

参考书目

钱宁，万兆惠．泥沙运动力学．北京：科学出版社，1983

武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室．河流泥沙工程学．北京：水利出版社，1981

（姜乃森）

nisha moxing shiyan

泥沙模型试验 (sediment model test)

研究泥沙问题的水工模型试验。它是在水工模型试验的基础上，增加泥沙运动相似准则，用来研究水利水电枢纽工程、工农业引水口建筑物或其它局部河段平面形态变化和河槽冲淤变化的模型试验。如模型底部为可动材料塑造而成，则称为动床模型。

泥沙模型试验主要模拟挟沙水流和河床的相互作

用，除满足水流运动相似条件，即河槽边界条件几何相似、水流流态相似、水流阻力相似、弗劳德 (Froude) 数相等诸条件外，同时还要满足泥沙运动相似条件，即泥沙沉降速度、起动流速和扬动流速的比尺与水流速度比尺一致，模型沙级配条件符合天然沙级配条件。泥沙模型一般分为悬沙模型和底沙模型，也有采用全沙模型，即在模型中同时满足悬沙和底沙运动相似条件。常见泥沙模型多为变态模型，其水平比尺大于垂直比尺，二者之比称为变率。常用的模型沙材料有煤屑、煤灰、轻质塑料沙（苯乙烯二乙烯共聚体）、电木粉（酚醛塑料）以及经过沥青处理的木屑等。

由于泥沙运动的复杂性，严格地同时满足各种相似条件实际上是不可能的。从实用要求出发，在保证主要目标相似前提下，允许其他相似指标有所偏离，但不超过一定范围。例如以模拟冲刷为主的模型，淤积相似条件允许有所偏离，反之亦然。因此在正式试验前，要用已有资料对模型设计及选沙进行验证试验。

目前泥沙学科本身仍不够成熟，各家公式计算差别甚大。因此模型试验成果主要依赖于验证资料的可靠性。同时也与试验人员的技术水平及经验有关。应用泥沙试验成果时，应给予科学的判断。

泥沙模型试验在中国是 50 年代以后逐步发展起来的。中国钱宁等人在泥沙模型试验的理论和实践中作出重要贡献。进入 70 年代中期以后，为满足葛洲坝工程、三峡工程等的要求，中国泥沙模型试验进一步得到发展，已处于世界前列。

参考书目

钱宁，动床变态河工模型律，北京：中国科学出版社，1957

（丁联臻）

nisha qidong liusu

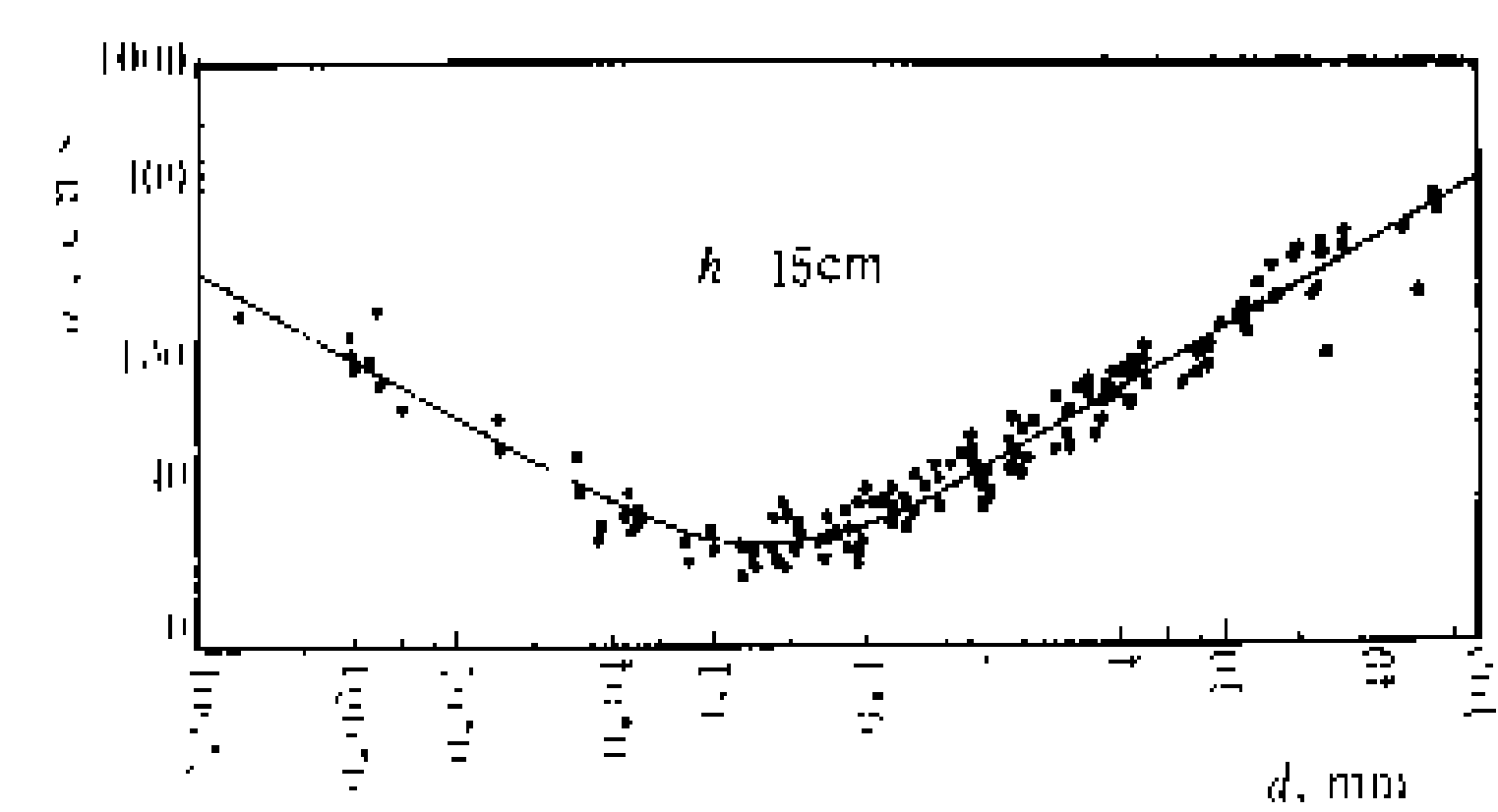
泥沙起动流速 (incipient velocity of sediment)

使河床上的泥沙颗粒脱离静止状态开始运动的临界水流速度。床面沙粒受到的作用力主要有水流的上举力和推移力，保持沙粒稳定的有沙粒的自重和沙粒之间的粘结力。当水流作用力超过重力和粘结力时，沙粒开始运动。由于沙粒的大小、形状和所处的位置不同，且水流作用力具有脉动性质，因此沙粒起动存在着随机性，缺乏严格的起动界线，造成目前众多起动流速公式有较大差异。对于非粘性的粗颗粒，重力是抗拒起动的主要力量，对于粘性细颗粒粘结力则是抗拒起动的主要力量。因此，起动流速公式必须考虑两者的综合影响。下列公式具有代表性

$$u_c = \left(\frac{h}{c} \right)^{0.14} \left(17.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d + 0.000000605 \frac{10 + h}{d^{0.72}} \right)^{1/2}$$

ni 泥

式中 u_c 为起动流速, m/s ; h 为水深, m ; d 为泥沙粒径, mm ; γ_s, γ 分别为泥沙及水的重率, kg/m^3 。上式括号中的第一项反映重力的作用, 第二项反映粘结力的作用。当粒径较大时 ($d > 2 mm$), 括号中的第二项接近于零, 起动流速随 d 的增大而增大。当 $d < 0.02 mm$ 时, 括号中的第一项可忽略不计, 而随着 d 的减小, 因粘结力的增加使 u_c 也增加。许多试验资料表明: 在水深等于 $0.15 m$ 的情况下, 最低的起动流速发生在粒径约为 $0.15 \sim 0.20 mm$ 范围内, 大于或小于此粒径的泥沙, 起动流速都要增加。见图。



考虑颗粒间粘结性后所得到的
起动流速与粒径间的关系

参考书目

武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室. 河流泥沙工程学. 北京: 水利出版社, 1981

(姜乃森)

nishulu

泥石流 (mud and debris flow) 发生在山区的一种携带大量泥沙和石块의 间歇性洪流。泥石流中固体物质含量有时超过水量, 往往突然发生, 持续时间很短。常沿干涸的谷地或冲沟流动, 是半干旱及温带山区常见的自然灾害现象。泥石流爆发时, 倾泻而下的泥石洪流具有惊人的破坏力, 摧毁沿途的一切建筑物、道路和桥梁, 淹埋农田、森林, 堵塞江河, 给国民经济造成很大的灾害。

泥石流区段划分 ①泥石流形成区。位于流域上游, 多为高山环抱的山间盆地或洼地, 是泥石流固体物质和水的主要供给地段。②泥石流流通区。位于泥石流沟的中游地段, 多为狭窄河谷, 地势陡峻, 沟床纵坡大。③泥石流堆积区。位于泥石流沟口开阔地带, 大小石块混杂堆积, 多呈不规则扇形或锥形, 地面垄岗起伏, 坎坷不平。

泥石流形成条件 泥石流是在一定的地形、地质及气候条件下形成的。①地形条件。上游有较大的汇水面积, 周围山坡及沟床纵坡较陡, 有利于大量水流和泥石的迅速汇集和流动。②地质条件。汇水区内广泛分布

松散堆积层, 或山坡岩体强烈风化、破碎, 或滑坡、崩塌等不良地质现象发育, 为泥石流提供大量的固体物质。③气候条件。在泥石流中上游地区, 有突发性暴雨或冰川积雪的强烈消融, 为泥石流提供充沛的水源。

泥石流分类 分为泥流、泥石流及水石流三类。①泥流。所含固体物质主要为细粒泥沙, 仅少量碎石及岩屑, 流体粘度大, 多呈稠泥状, 主要分布在黄土高原地区。②泥石流: 由大量细粒物质(粉砂、粘土)和巨大石块、漂砾等组成, 分布地区广泛。③水石流。主要由大石块和水或稀泥浆组成, 多发生在石灰岩、白云岩及大理岩山区。

泥石流治理 一般需采用综合的治理措施。在泥石流沟上游开展水上保持工作(平整山坡、植树造林、修建谷坊), 以减少泥石流固体物质的补给来源; 在泥石流沟内修建多道拦砂坝, 以减缓沟床坡降和防止沟床下切而引起谷坡坍塌; 在泥石流堆积区增强沟槽的排泄能力, 修筑防护工程, 尽量减少泥石流的危害。

(邹小安)

nian fadianliang

年发电量 (annual output of energy) 从水电站发电机母线年送出的电量的总和, 包括厂用电和输电损失。作为水电站特征值指标, 一般指多年平均年发电量, 即水电站年发电量的数学期望值。年发电量综合地表示水电站的能量效益。水电站的年发电量决定于河流的径流特性、水电站的利用水头、装机容量、调节性能(含上游库的调节性能)、机组效率及系统运行特性。当水电站的建设方案确定以后, 其年发电量, 主要决定于每年的来水及其分配以及水库运行方式。来水比较均匀或水库调节性能较好的水电站, 每年的发电量差别较小, 有利于电力系统的运行。年径流变化较大或调节性能较差的水电站, 其枯水年与丰水年的发电量相差较大, 影响水电站效益的发挥。

(伍宏中)

nian shushaliang

年输沙量 (annual sediment yield) 一年内通过河道某断面的输沙总量, 以万 t 或亿 t 计。年输沙量包括悬移质泥沙及推移质泥沙两部分, 它是工程规划设计中计算水库淤积及引水防沙设计的基础资料。

悬移质泥沙的输沙量 G_s 。一般占年输沙量的 90% 左右。 G_s 除以年水量为年平均含沙量 ρ , 以 kg/m^3 计。一条河流的 G_s 及 ρ 与流域的面积、坡度、地表土壤、植被、年水量及暴雨强度有关。黄河中游山西、陕西两省分布大片黄土高原, 土壤松散, 植被稀少, 暴雨强度

大,因此黄河三门峡站多年平均年输沙量达 16 亿 t,多年平均含沙量 37.5 kg/m^3 , 在世界大河中首屈一指。中国南方河流长江、珠江及其支流多为土石山区,植被好,年平均含沙量一般小于 1 kg/m^3 。长江宜昌站多年平均悬沙年输沙量为 5.22 亿 t,相当黄河的 1/3;南方其他大河悬沙年输沙量皆小于 1 亿 t。世界及中国主要河流的年输沙量及含沙量见河流泥沙。

推移质泥沙一般为粗沙、砾石或卵石。推移质一般占年输沙量的比例较小,在平原地区河流约占 1%~5%,丘陵地区河流约占 5%~15%,山区河流约占 15%~30%或更大。

输沙量年内分布很不均匀,主要集中在汛期(南方 5~9 月,北方 7~10 月)约占年输沙量的 90%,汛期几次洪水过程的输沙量可占年输沙量的 40%~50%。

输沙量年际变化也很大,主要与流域各年降水量及暴雨强度有关。一般河流丰沙年与枯沙年的年输沙量可差几倍甚至十几倍。工程设计中统计多年平均年输沙量,需要较长的实测泥沙系列资料,其中应包括丰、平、枯沙年。如果实测泥沙资料年限短(3~5 年),系列代表性不够,计算的多年平均年输沙量可能偏大或偏小。

(唐友一)

nianya nunningtu

碾压混凝土坝 (roller compacted concrete dam) 用振动碾分层碾压干硬性混凝土筑成的坝。碾压混凝土筑坝方法是对传统筑坝方法一次重大改革。外国自 20 世纪 70 年代初开始进行碾压混凝土坝试验研究以来,据 1987 年不完全的统计,已建和在建的碾压混凝土坝共约 50 余座,其中已建成的最高的碾压混凝土坝是日本玉川重力坝,坝高 103 m。1982 年建成的坝高 52m 的美国柳溪坝 (Willow Creek Dam) 是世界上第一座全碾压的混凝土重力坝。中国自 20 世纪 70 年代后期开始研究以来,1986 年建成了福建坑口水电站碾压混凝土重力坝,坝高 56.8 m,是我国第一座碾压混凝土坝。1988 年中国在建的约有十余座碾压混凝土坝。碾压混凝土坝多为重力坝,也有用于重力拱坝的。碾压混凝土坝需在坝的上游面设防渗层。碾压施工方法主要有薄层连续碾压和厚层间歇碾压两种。日本采用厚层间歇碾压,并在坝的上下游面浇筑一层常规混凝土(即所谓“金包银”)。这种施工方法称为 RCC (Roller compacted dam) 施工法。其他多数国家采用薄层连续碾压,在上游坝面采用简化的防渗结构,称为 RCC (Roller compacted concrete) 法。碾压混凝土坝的主要优点是:①可采用土石坝施工的运输机械运输碾压混凝土,用振动碾压实,工艺简单,坝体得以

快速上升,缩短工期。②可掺用大量粉煤灰(约占胶凝材料的 30%~70%),以减少水泥用量,降低混凝土的绝热温升,简化温度控制措施。③可降低混凝土单价,节约投资。

(郑顺炜)

nianya nunningtu shigong

碾压混凝土施工 (roller compacted concrete construction) 用振动碾碾压振实混凝土的办法,修建建筑物的施工工艺。碾压混凝土是采用超干硬性混凝土,在大仓面条件下,用自卸汽车运输,推土机摊铺平仓,振动碾分层碾压振实,振动切缝机切缝的一种连续施工工艺。用碾压混凝土筑坝,改变了从 20 世纪 30 年代美国修建胡佛坝 (Hoover Dam) 开始逐步形成的一套采用分缝分块、柱状浇筑和一系列温度控制措施的传统施工方法,是世界上混凝土筑坝技术的一项重大发展。与常规的施工方法比较,碾压混凝土在节约水泥,降低工程造价和缩短施工工期等方面,效益显著。

材料特性 碾压混凝土与常规混凝土在材料性质上的差别,主要是混凝土配合比不同。它采用的是超干硬性混凝土,即混凝土拌合物的坍落度为零,并且工作度(或称干硬度) $>180 \text{ s}$ 。要求混凝土既有一定的稠度,以承受振动碾的重量而不陷车,同时还要有一定的塑性,以便拌和均匀,取得较好的碾压振实的效果。在施工中,用维勃稠度仪测定混凝土的稠度,一般控制在 20 s 左右。碾压混凝土的单位水泥用量较常规混凝土少。有些工程采用包括水泥和掺和料的胶结材料总量只有 $120 \sim 130 \text{ kg/m}^3$,其中掺和料占 30%~60%。掺和料一般采用粉煤灰,也有的用火山灰。碾压混凝土的抗渗性能较差,用以筑坝时须设法解决坝体的防渗问题,如在迎水面采用常规混凝土或预制混凝土面板作为防渗护面,并作好止水设施。

施工特点 碾压混凝土施工的特点是:①采用常规的土石方施工机械进行施工,例如自卸汽车、推土机、振动碾。②不用振捣器振捣,用振动碾分层碾压。③采用通仓薄层施工,每层摊铺的厚度约为 20~30 cm,碾压层厚可达 50~70 cm,视振动碾性能而定。④用碾压混凝土筑坝时,一般不设纵缝,横缝在平仓后或碾压后用切缝机切割,切缝的同时压入镀锌铁片或塑料片填缝,以免重新闭合。⑤由于水泥用量少,水化热低,并且通仓薄层施工的散热条件好,混凝土温度控制的措施比较简单。

发展概况 碾压混凝土早期首先应用于公路路面和围堰工程。中国台湾省西门坝的围堰工程于 1960 年施工,围堰心墙采用碾压混凝土,高 65 m。20 世纪 70

Nu 怒

年代初,在第 10 届和第 11 届国际大坝会议上,都提出了用碾压混凝土建造重力坝的建议。在此前后,一些国家对碾压混凝土技术也都进行了许多试验研究工作。1974~1979 年,在巴基斯坦塔贝拉(Tarbela)坝修复工程中大量使用碾压混凝土,共采用 230 万 m³。1978~1980 年,日本将碾压混凝土用于高 89 m 的岛地川重力坝 20 万 m³ 的内部混凝土,和高 78 m 的大川坝 30 万 m³ 的基础混凝土。美国于 1982 年 5~9 月,建成高 49 m 的柳溪(Willow Creek)坝,混凝土量为 31.3 万 m³,是第一座全碾压混凝土重力坝。中国于 1986 年在福建以碾压混凝土建成高 56.8 m 的坑口重力坝。

(王庭济)

Nujiang shuixi shuinneng ziyuan

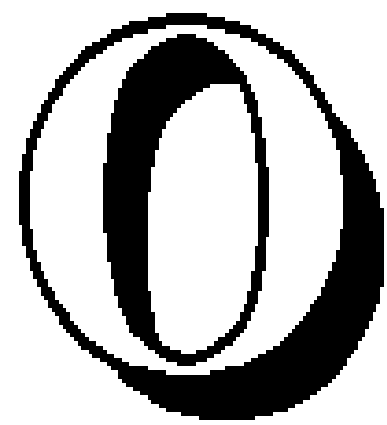
怒江水系水能资源 (hydropower resources of Nujiang river system) 据 1980 年《中华人民共和国水力资源普查成果》统计,中国境内怒江水系理论蕴藏量为 4029.6 亿 kW·h/a,占中国的 6.8%;其中可能开发资源(见水能资源)615.05 亿 kW·h/a,占中国的 3.2%。在水系内部水能资源集中在干流,占全水系(中国境内)的 79.15%。因流域呈狭长带状,支流短小,各支流的水能资源不多。

怒江发源于西藏自治区唐古拉山南麓的安多县,流经云南省出国境,进入缅甸后称萨尔温江,注入印度洋的安达曼海,是一条跨国河流。中国境内怒江水系流域面积 12.48 万 km²,干流长 2013.4 km,落差 4840 m,国境处多年平均年径流量 580 亿 m³。

怒江流域呈狭长状,较大的支流仅有下秋曲、索曲、姐曲、伟曲、猛波罗河和流出国境进入缅甸后注入干流的南丁河等 6 条,其余支流大多数为短而小的河流,因而水能资源集中于干流。干流水能理论蕴藏量为 3189.29 亿 kW·h/a,理论蕴藏量 1 万 kW 以上的各级支流共 59 条,以伟曲最多,为 219.88 亿 kW·h/a。

怒江水系地处中国边陲,水能资源开发研究工作,尤其是对西藏自治区境内的干支流的研究工作做得不多。可能开发的单站装机容量 1 万 kW 以上的水电站 22 座,总装机容量 1030.93 万 kW,平均年发电量 615.05 亿 kW·h。其中干流装机容量 1000 万 kW,平均年发电量 597.3 亿 kW·h,占全水系的 97%。怒江水系干流可能开发的水电站均为大型水电站,6 座水电站装机容量均在 60~300 万 kW 之间,是云南省远期具有重要意义的能源资源。西藏自治区境内可能开发的水能资源尚待研究。

(赵敏崑)



Ouzhou shuineng ziyuan

欧洲水能资源 (hydropower resources of Europe) 据英国《国际水力发电与坝工建设》

1993 年手册统计, 除苏联外, 欧洲河川共有水能理论蕴藏量 24000 亿 kW · h/a, 技术可开发资源 10000 亿 kW · h/a, 经济可开发资源 8000 亿 kW · h/a。欧洲海岸线曲折, 具有潮汐能可开发资源 140 亿 kW · h/a。
除苏联外, 欧洲共有 28 个国家, 面积 488 万 km², 绝大部分地区气候湿润。靠近大西洋向风坡地区的年降水量在 1000 mm 以上, 广大的低山、丘陵、高原地区的降水量在 500~1000 mm 之间。欧洲北部斯堪的纳维亚和南部的阿尔卑斯山脉的海拔较高, 其余都是处于海拔 200 m 以下的平原。河流主要有多瑙河、莱茵河、罗纳河、杜罗河、律勒河等。基于以上地形和降水条件, 欧洲以挪威、瑞典、瑞士、法国和意大利等国的水能资源较为丰富, 见表。

欧洲一些国家的水能资源及其利用程度表

国 家	理论蕴藏量 (亿 kW · h/a)	技术可开发资源 (亿 kW · h/a)	经济可开发资源 (亿 kW · h/a)	1991 年已开发利用 (亿 kW · h/a)	利用程度 (%)
挪 威	5560	1720	1350	1083	63.0
瑞 典	2000	1300	950	623	47.9
法 国	2660	720	645	567	78.8
西 班 牙	1504	656	600	314	47.9
意 大 利	1500	765	641	423	55.3
奥 地 利	1500	750	537	317	42.3
南 斯 拉 夫	1100	660	475	201	30.5
瑞 士	1440	410	370	301	73.4
冰 岛	1870	640	450	42	6.6
德 国	1200	270	200	178	65.9
葡 萄 牙	322	245	198	89	36.3
芬 兰	460		197	130	
罗 马 尼 亚	700	400	170	109	27.3
阿 尔 巴 尼 亚			170	52	
希 腊	840	250	160	32	12.8
保 加 利 亚	264	150	105	24	16

注: 资料来源: 英国《国际水力发电与坝工建设》1993 年手册及各国资料。

欧洲各国在水能资源开发过程中注意在山区支流建调节性能好的水库、高水头水电站, 而在平原河流建径流式水电站, 两类水电站互相配合运行。在多瑙河、

莱茵河、罗纳河等都结合航运建设梯级水电站。
(高又生)

P

Panjiakou Choushui Xu'neng Dianzhan
潘家口抽水蓄能电站 (Panjiakou Pumped Storage Power Station) 混合式抽水蓄能电站，位于河北省迁西县灤河桥镇上游 10km 处灤河干流上。电站设计总装机容量 420 MW，多年平均年发电量 5.64 亿 kW·h，其中，天然径流发电量 3.56 亿 kW·h，抽水蓄能电量 2.08 亿 kW·h。电站用 220 kV 输

上水库和下水库 上水库为潘家口水库。坝址以上流域面积 3.37 万 km²，多年平均年径流量 24.5 亿 m³。水库校核洪水位 227.0 m，相应库容 29.3 亿 m³；最高蓄水位 224.7 m，相应库容 22.45 亿 m³；正常蓄水位 222 m，相应库容 20.62 亿 m³；死水位 180 m，相应库容 3.3 亿 m³。为多年调节水库。主坝按千年一遇洪水设计，洪峰流量 40400 m³/s，按五千年一遇洪水标准校核，洪峰流量 54500 m³/s。主坝为混凝土宽缝重力坝，最大坝高 107.5 m，坝顶长 1039.11 m，坝顶高程 230.5m。溢流坝段设 18 孔溢洪孔，用弧形闸门控制，尺寸为 15 m×15 m，千年一遇洪水时，下泄 33600 m³/s。此外，底孔坝段还设置了 4 个深式泄水孔，孔口尺寸为 4 m×6 m，用弧形闸门控制。见图 2。

在主坝下游 5.5 km 处建混凝土重力坝，壅高尾水位，形成下水库。最大坝高 28.5 m，坝顶长 1098 m。设有 20 孔溢洪闸及 20 孔无闸溢洪坝段。正常蓄水位 144.0 m，最低水位 139.0 m，调节库容 1000 万 m³，死库容 452 万 m³。水位 150 m 时，总库容 3168 万 m³。按五十年一遇洪水设计，五百年一遇洪水校核，最大泄洪能力为 28000 m³/s。

厂房 主厂房为坝后式厂房，长 128 m，宽 26.2 m，高 31.7 m。内装单机容量为 150 MW 的常规混流式水轮发电机组 1 台和单机容量为 90 MW 的可逆式抽水蓄能机组 3 台。用坝内埋设的单元压力钢管引水。两种机组所用管径分别为 7.5 m 和 5.6 m，管长分

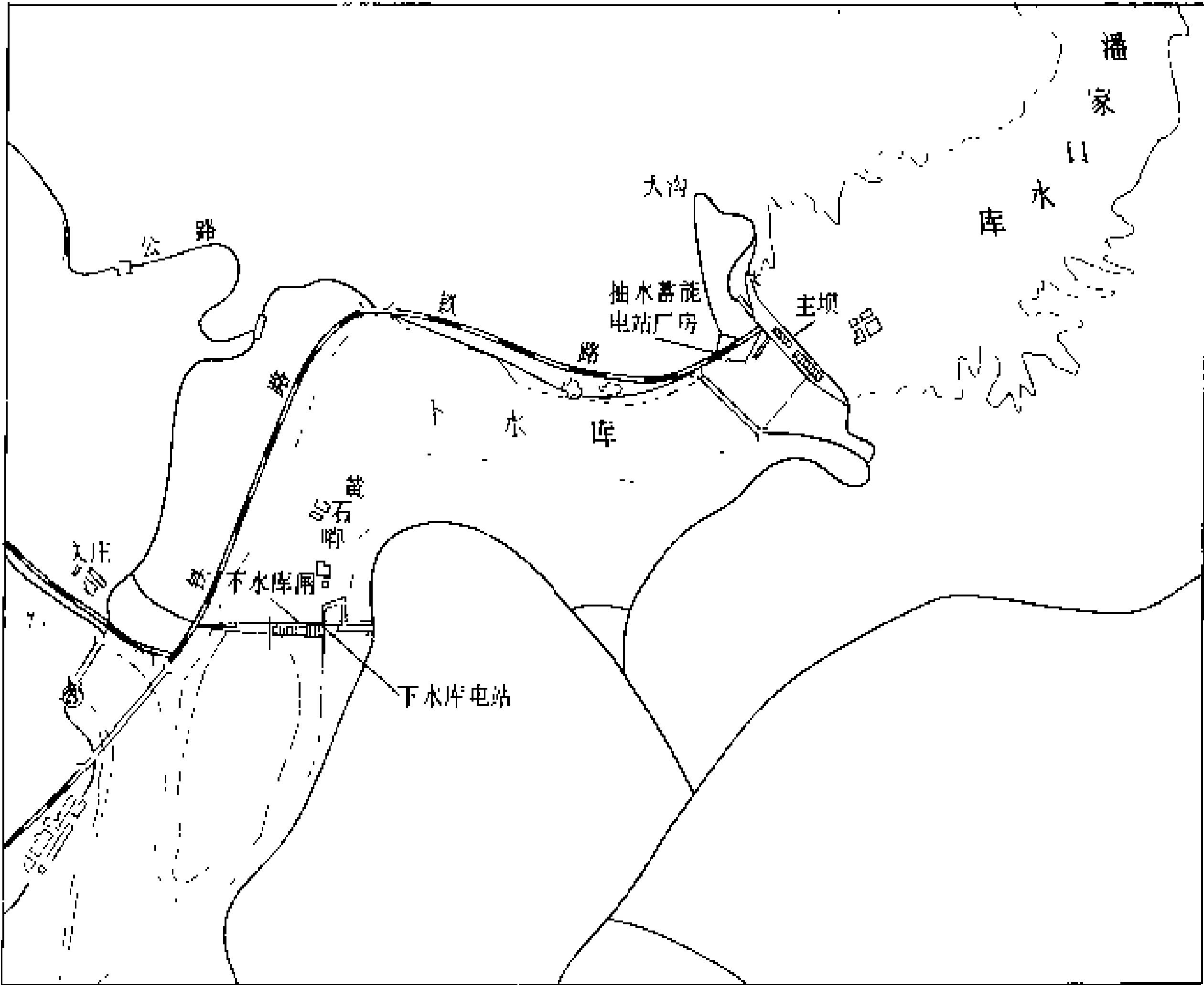


图 1 潘家口抽水蓄能电站工程总布置

电线路向京津唐电力系统供电，起削峰填谷作用，每年发电 1411 h，抽水 1071 h。潘家口水利枢纽还是天津市、唐山地区城市生活及工农业供水的主要水源之一，并兼有防洪效益。工程分两期建设，一期工程包括主坝、副坝、坝后式厂房及 1 台常规机组；二期工程包括 3 台抽水蓄能机组、下水库低坝、下水库电站及相应设施。一期工程于 1975 年 10 月开工，常规机组于 1981 年投产。二期工程于 1984 年动工，3 台抽水蓄能机组均于 1992 年末投入运行。工程总布置见图 1。

别为 85.836 m 和 91.331 m。进水口设快速闸门。
下水库坝左侧建有 1 座河床式厂房，长 45 m，宽 49.53 m，高 20.5 m，内装 2 台单机容量为 5 MW 的灯泡式贯流机组。
抽水蓄能机组 混流可逆式水泵水轮机，转轮直径 5.53 m。水泵工况用两种转速运行：扬程为 65.1～85.7 m 时，转速为 142.86 r/min；扬程为 36～66.4 m 时，转速为 125 r/min。扬程 70.11 m 时，流量 119.5 m³/s，输入功率 89.050 MW；扬程 54 m 时，流量 103.9

m³/s,输入功率 59.7 MW。水轮机工况:最大水头 85 m时,出力 100 MW;额定水头 71.6 m 时,出力 90 MW,流量 145.4 m³/s;最小水头 36 m 时,出力 26.95 MW。机组比转速180m·kW,最大飞逸转速245r/min。

发电电动机为两种同步转速的变极电机。发电机运行时额定功率 91 MW,电机效率 98.05%。电动机运行:42 极时输入功率 96 MW,转速 142.8 r/min;48 极时输入功率 59.5 MW,转速 125 r/min。

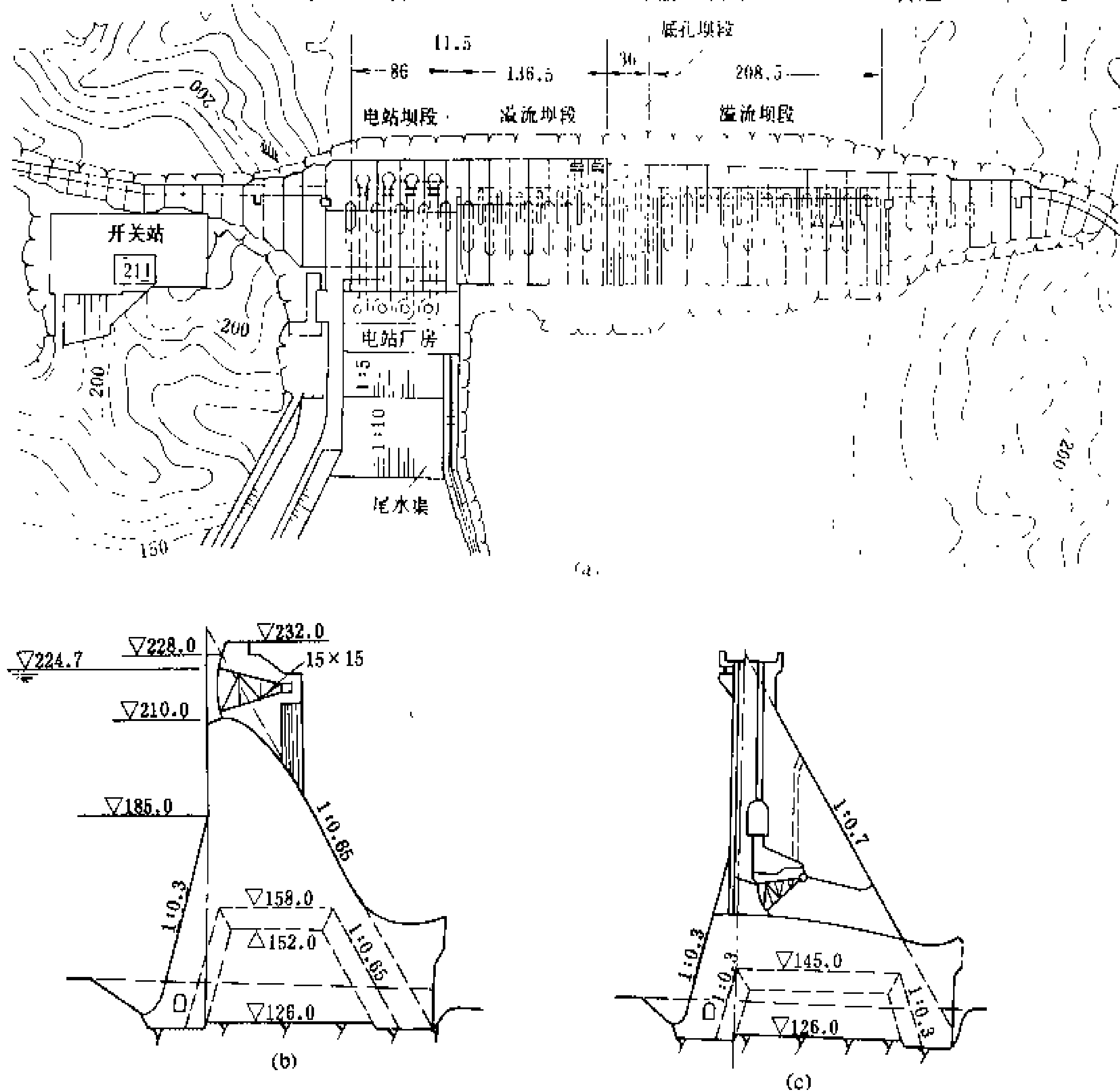


图 2 潘家口抽水蓄能电站枢纽布置

采用自并激静止式励磁。采用电气液压调速器,油压 5 MPa。除常规自动化元件外,还装有主轴摆动仪、顶盖水平和垂直振动仪、水轮机主轴密封块磨损检测仪、油箱内混水报警器、下机架变形仪和发电机组冷却排水管自动调节阀等。

为水泵起动,装有 1 组 60 MW 变频器。当水头在 60 m 以下时,变频器可带 1 台机组在水泵及水轮机工况做变速运行。由于应用变频器,使低水头段机组总效率由 59%增加到 77%,因而使电站的替代工作容量提高 15%,同时改善了机组汽蚀和振动条件,达到安全稳定运行要求。

每台机组配 1 台三相变压器,额定容量 100 MV·A,电压变比为 220±11×1.4% kV/13.8 kV,采用高压侧有载调压开关。变压器按特殊要求设计,以满足带

变频器变速运行的要求。

设计和施工 天津勘测设计研究院设计,武警水电一支队施工。

(杨承沪)

plancha xishu

偏差系数 (coefficient of skewness) 表示变量概率分布对称性和分布方向的相对指标,也称偏态系数,代表符号为 C_s ,计算公式:

$$C_s = \frac{1}{C_v^3 \bar{x}^3} \left[\int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^3 f_x(x) dx \right]$$

式中 \bar{x} 为均值, $f_x(x)$ 为概率密度函数, C_v 为离差系数。 $C_s > 0$ 表示大于均值的各项值占优势,称为正偏; $C_s < 0$ 表示小于均值的各项占优势,称为负偏; $C_s = 0$ 表示



大于和小于均值的各值都不偏,称为对称。上述 3 种情况对概率密度曲线和概率分布曲线的影响见图 1 和图 2。

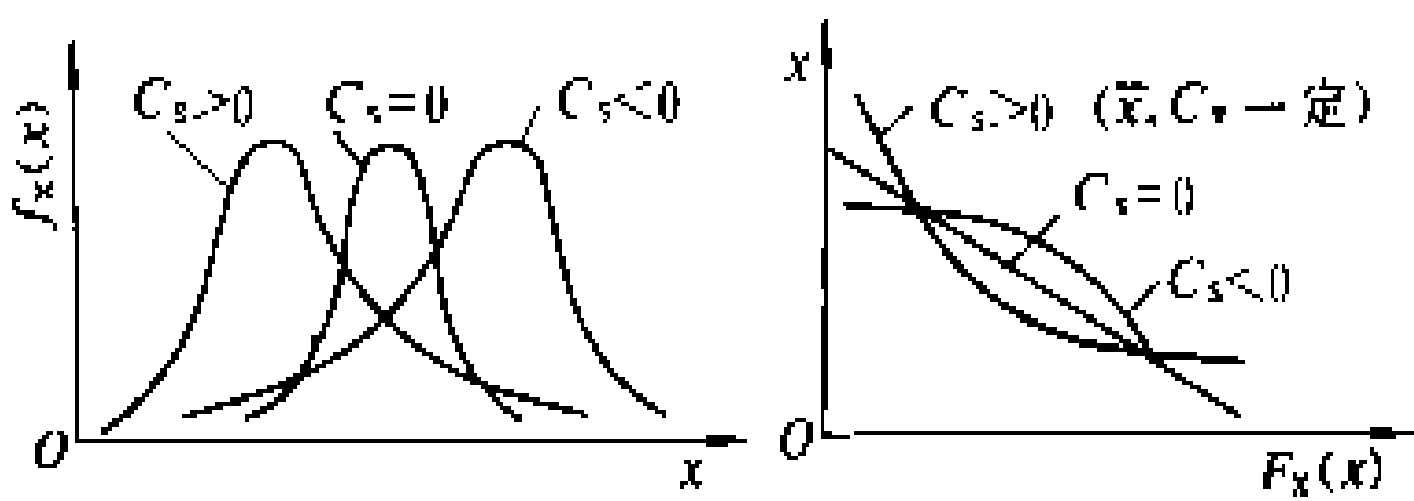


图 1 C_s 对密度曲线的影响 图 2 C_s 对分布曲线的影响

中国水文变量的 C_s/C_v 的变化,年径流在 2.0 左右;洪水在 2.5~6.0 之间;暴雨在 3.5 左右。
(林益冬)

pingmian kongzhi celiang

平面控制测量 (horizontal control survey)

为求得地面点的平面位置而建立的三角、导线和图根(点)网的测量工作的总称。地面点的平面位置采用某种投影建立的平面直角坐标系表示,以南北方向的纵轴为 X 轴,东西方向的横轴为 Y 轴,方位角以正北顺时针方向起算。1959 年中国国务院批准试行《中华人民共和国大地测量法》(草案)规定国家三角点坐标暂依“1954 年北京坐标系”推算,即采用统一高斯投影直角坐标系,参考椭球体长半径为 6378245 m,扁率为 1:298.3,中国地处北半球,以每隔 6°和 3°分带,主子午线由东经 75°起计算高斯-克吕格平面直角坐标,以主子午线和赤道交点作为纵坐标起算的零点,横坐标定为 500000 m。在 1972 年至 1982 年我国天文大地整体平差时,建立了新的大地基准“1980 西安坐标系”,原点建在陕西省泾阳县。采用国际大地测量学和地球物理学联合会第 16 届大会推荐的椭球参数,长半径为 6378140 m,扁率为 1:298.257。

平面控制网的布设 为了控制全局和限制各种测量误差的积累,应从整体到局部,分级布设,逐级控制。中国国家大地控制分一、二、三、四等三角网或相应的精密导线网(点)。水电工程测量的平面控制基本控制分首级控制、图根控制和测站点等三级布设。规划设计阶段的测量范围较大,一般与国家等级(点)网联测,若因地区条件限制,可以布设独立网,采用独立坐标系。对水工建筑物的枢纽区平面控制布设,应考虑以后大比例尺测图的需要,宜布设较高精度的首级控制或基本控制。平面控制的测量方法,通常采用三角测量、三边测量、边角测量和导线测量。近年来世界各国开始将全球定位系统应用于平面控制测量、研究。

三角测量 将地面上连续布设的三角形(单三角、

四边形、中点多边形等)组成的锁(网),用经纬仪进行水平角观测,一般采用方向法或称全圆法和组合法测定三角形的各角;锁的两端各测定一条起始边和方位角,推算锁(网)的其他各边长和方位角,经平差后,求出各三角形顶点的坐标,起始边的传统测定方法,是选定基线网直接丈量最短边长。现代测量可采用高精度的电磁波测距方法测定起始边长度。方位角以天文测量方法推得。

三边测量 采用测边方法来测定各三角形顶点的平面坐标的方法。自从电磁波测距仪问世以后,测距精度提高,施测方便,这种方法得到广泛应用。三边测量可提高方位精度,但存在三角形内角校核条件之不足。

边角测量 三角形测量与三边测量结合的平面控制测量。可控制边长误差和方位误差的积累,其精度极高,但工作量较大,一般只在特殊高精度控制测量中应用。

导线测量 建立地面控制的又一种方法。在地面上选择一定的点组成导线,测量相邻两点间的距离和相邻两边间的夹角。根据一个起始点的坐标和方位角,利用测得的边长和角度依次推算各导线点的平面位置。导线测量的精度与等级三角测量相同的为精密导线测量,以下的为普通导线测量。导线的测角一般采用经纬仪,特殊情况下也有应用罗盘仪的。导线的测边有多种方法与工具,采用因瓦带尺、钢尺、竹尺、测链或测绳等直接丈量边长的称为经纬仪导线测量;采用光学法测距的有视距法、双像测距法和应用横尺或实量横基线的视差法,称视距导线测量和视差导线测量。自从电磁波测距仪问世以后,由于作业迅速、精度高、受地形限制小等优点,已被广泛重视和应用。与计算器结合,既可代替传统的记录,又能实地发现观测差错及时修正,并在收测前可得到导线的计算成果与测量精度,经济效益极好。如采用全站式电子速测仪施测导线,更为理想与方便。

全球定位系统 以卫星为基础的无线电导航定位系统,具有全能性(陆地、海洋、航空和航天)、全球性、全天候、连续性和实时性的导航、定位、定时的卫星系统,能提供精密的三维坐标的新方法。中国及世界各国均已开始了在大地测量、位移监测、海洋测绘、航空摄影中的应用研究。这一崭新手段的实际应用,将推动平面控制测量的巨大变革。

参考书目

陈永龄,大地测量学,北京:测绘出版社,1958

(茅玉清)

pingmian zhamen

平面闸门 (plane gate) 由平面面板和纵横

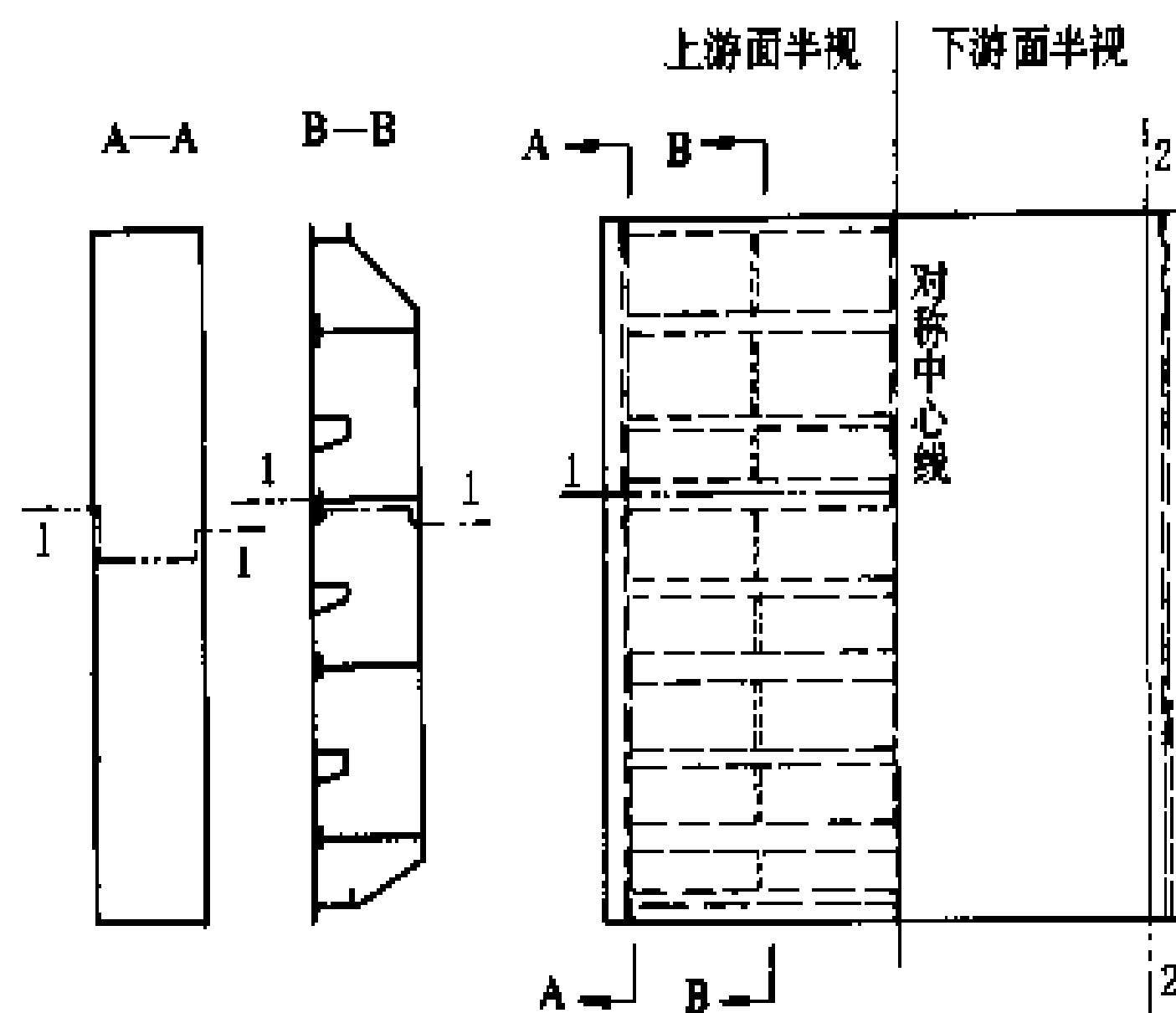
梁系组成的闸门,又称平板闸门。水利水电工程常用的平面闸门为直升式平面闸门,即其门叶两侧支承在埋设在门槽内的轨道上,升降时沿着轨道上、下移动。为保证升降平稳,门叶两侧除设支承行走结构外,尚需设置侧、反导向装置。为防止漏水,门叶周边设有连续的止水装置。这类闸门构造简单,制造安装方便,可移出孔口,互换通用,便于检修维护,能使用移动式启闭机操作。因此,它广泛应用于水利水电工程上,作为事故闸门、检修闸门或工作闸门。其缺点为:门槽干扰水流流态,容易引起空蚀、振动等问题,严重时可能影响闸门的正常运行;启闭力较大;闸墩厚度因门槽削弱而增厚;启闭机操作平台较高。

平面闸门的面板一般设在上游承压侧,但也有设在下流受拉侧的(如检修闸门等),以减免作用在闸门上的浮托力。纵横梁系结构一般采用同层连接方式,多采用主横梁,因此门叶的运输单元以横向分段为多。但有时为确保闸门支承行走结构的制造加工和安装精度,也有沿门叶边梁竖向分块,而其余部分仍为横向分段,见图所示。

平面闸门的支承行走结构型式有滑动和滚动的两大类。因此按支承行走结构分,常用的有滑道式、滚轮式和履带式三种。

滑道式平面闸门 又称平面滑动闸门。滑道材料有木、金属、胶合层压木和复合材料等。木滑道多用在小型闸门上,结构简单,造价低,但材料本身耐久性差。金属滑道往往应用在高水头小孔口的闸门上,如在中国官厅、梅山等水库输水闸门上都使用了铜滑道,并兼作闸门止水。它制造加工复杂,维修更换困难。胶合层压木滑道系 20 世纪 50 年代发展起来的支承形式,构造简单,制造安装方便,摩擦系数小,但有老化现象和

摩擦性能不稳定等缺点。近年又开发了填充 F-4 板型、GS 型和 SF 型三层复合材料等滑道,都具有一定的承载能力和较小的摩擦系数。



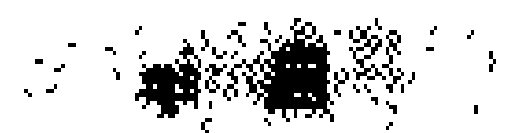
门叶运输单元的划分示意图

1 1 横向分段; 2 2 门叶边梁竖向分块

滚轮式平面闸门 又称平面定轮闸门。应用历史较久,其明显优点为行走时摩阻力小。据闸门承载大小选取不同材质的滚轮,一般有铸铁、铸钢和合金铸钢等滚轮。滚轮型式依其轮轴的支承条件可分为悬臂式和简支式。前者单轮的承载能力小,后者承载能力大。目前简支式合金铸钢单轮的承载力已达 4000 kN 以上。

履带式平面闸门 又称平面链轮闸门,它的门叶、门槽与滑动闸门大体相似,仅其支承行走结构系采用短链板串连众多辊柱组成链轮带,绕门叶两侧边梁支承面而回转,使闸门沿门槽轨道升降。这种闸门承载能力大,摩阻力小,抗震性能好;但辊柱、链板及轨道等加工精度要求高,制造安装复杂,维护费用较高。

(沈德民)



qibiji

启闭机 (hoisting machine) 用以操作闸门及拦污栅的机械设备。对启闭机的基本要求有：①运行安全可靠；②操作维护方便；③结构简单，体积小，重量轻，外形美观；④造价及维护费用低。

启闭机按是否设置行走机构分为固定式和移动式；按驱动方式分为人力驱动、电动机驱动和内燃机驱动；按传动方式分为机械传动和液压传动；按与闸门连接构件分为柔性构件（如钢丝绳、链条）连接和刚性构件（如螺杆、齿条、活塞杆）连接两类。螺杆式、卷扬式和液压式启闭机属固定式启闭机。移动式启闭机是一种沿轨道行驶，能逐个操作多个闸门及拦污栅并兼作安装和检修启闭设备的机械。

螺杆式启闭机 利用传力螺旋，借承重螺母的旋转，使螺杆带着门叶升降，以达到启闭闸门的目的。单螺杆容量一般达 320 kN，大型可达 750 kN，行程在 5 m 以内，个别可达 7~8 m。螺杆在下降过程中，能对闸门施加一定的下压力。此类启闭机结构简单，操作方便，造价低廉，其动力可为手动或电动，广泛应用于小型水利水电工程上。

卷扬式启闭机 系用钢丝绳作为承重构件，通过滑轮组和传动装置提升闸门；关闭闸门时则需依靠闸门重量（包括加重及水柱重等）。它具有构造简单，制造、维护方便，广泛应用于各种水利水电工程上。

这类启闭机有多种结构布置形式。一般有单吊点和双吊点两种布置。前者由滑轮组、卷筒、传动机构、制动装置、机架、高度指示装置、限位装置和负荷限制装置等部件组成；采用人力、电动机或内燃机驱动；容量从 63~5000 kN，扬程从 8~34 m。双吊点布置则由两台左右对称的单吊点启闭机组成（唯在容量小时，其驱动装置可放在一侧）；两台间用刚性同步轴相连，以保证两吊点同步升降。当吊点距较大时，可采用电机同步运行装置，使两吊点同步升降。

液压启闭机 系应用液体作为传递动力的介质，推动活塞及活塞杆，使闸门升降。它具有体积小，重量轻，布置紧凑，启闭容量大，运行平稳，操作设备集中，

便于实行自动化和远动化等优点，容量可达 8000 kN 或更大，行程达 12 m 以上。按工作特点分单作用和双作用两种。前者在提升闸门时，压力油作用在油缸的活塞杆腔室，关闭闸门时则靠门自重。后者的压力油分别作用在油缸的活塞杆腔室及活塞腔室，使活塞杆分别承受拉力或压力，以达到启、闭闸门的目的。按油缸数量分有单吊点和双吊点液压启闭机，后者要求两个油缸操作时行程同步，以保证双吊点闸门升降平稳。按布置形式分有固定式、浮动式、立式摆动和卧式摆动等液压启闭机多种。

移动式启闭机 由起升机构、移动机构、门架、馈电装置、司机室和机械房等部分组成；门架上也有设置回转吊或单梁吊作为副钩。它有门式、半门式、桥式、台车式及单轨电动葫芦等多种型式；此外，还有用汽车式或履带式起重机兼做移动式启闭机用的。

这类启闭机按其移动的范围可分为单向和双向二种。前者适用于所操作的闸门起吊中心线在平面上均位于同一轴线上，而后者适用于各闸门起吊中心线可位于数条轴线上。移动式启闭机可借分节拉杆升降闸门，也可借自动挂钩梁挂脱闸门或升降闸门。这类启闭机可沿直线轨道行驶，也可沿曲线轨道行驶。

(张志宏)

qiti jueyuan jinshu fengbi dianqi

气体绝缘金属封闭电器 (gas insulated metal enclosed switchgear)

将开关站的电气元件组合在充有有压绝缘气体的密闭金属容器内的成套装置。组合的电气元件一般包括用相同绝缘气体作灭弧介质的断路器和负荷开关以及作绝缘介质的隔离开关、电流互感器、电压互感器、接地开关、避雷器、母线、电缆终端和引线套管等。广泛使用的绝缘气体为六氟化硫 (SF_6)，根据灭弧性能和绝缘性能的要求，决定充注绝缘气体的密度。气体绝缘金属封闭电器是 20 世纪 60 年代发展起来的新一代组合电器，产品额定电压已达 500 kV 和 800 kV，额定电流已达 8000 A，开断电流已分别达 63 kA 和 80 kA。额定电压为 1050 kV 的样机已研制成功，其额定电流最大达 12000 A，开断电流达 80~100 kA。它占地面积和占据空间均小，适合城市变电所，也适合水电站地下厂房、坝内式厂房和电压高、规模大的开关站的需要。

气体绝缘金属封闭电器的特点是：①占地面积和占用空间小。六氟化硫是一种高绝缘强度的气体，在均匀电场下，其绝缘强度是空气的 2~3 倍，灭弧能力约为空气的 100 倍。因而，其元件体积较其他型式的电气设备为小。它又能把各种电器紧凑地组合在一起，故比其他型式的开关站占地面积小很多。以 220 kV 电压为



例,就其设备本体所占面积而言,其占地面积约为屋外开关站的10%,其所占空间约为屋外开关站的5%。②设备运行安全可靠。气体绝缘金属封闭电器,没有暴露在大气中的外绝缘,不受污秽空气的影响,不受风、雨、冰、雪、潮湿以及气压变化的影响,也杜绝了小动物或其他外物引起的闪络事故。此外,没有火灾危险。六氟化硫气体,电弧电压低,燃弧能量小,消散电弧能量的能力强,介质强度恢复快,开断近区故障性能好,开断各种故障不产生复燃和过电压。它不仅易于满足开断大电流的要求,气体分子量大,比热大,对流换热能力强,且开断电弧时SF₆气体受热引起的压力上升缓慢,上升幅度小,因而一般没有爆炸危险。③因外壳隔离,无触电危险。④因金属外壳屏蔽,无无线电干扰。⑤噪声水平低。⑥抗震性能好。⑦安装工期短,维护工作量小,检修间隔周期长。气体绝缘金属封闭电器出厂前已调试合格,现场安装、调试简单,以220 kV为例,其工期只有普通电器的20%左右。气体绝缘金属封闭电器漏气量极微,一般年漏气率为1%~0.5%,不需清扫绝缘子,维护工作量大为减少。气体绝缘金属封闭电器因六氟化硫气体含氧量极低,断路器动作时,对触头烧损极微,断路器的平均检修周期约10~20年。⑧发生故障后,检查、检修时间较长。

存在的问题有:①气体毒性问题。纯净的六氟化硫气体是无毒和稳定的,但在开断电弧过程中产生的低氟化物具有毒性。正常运行时,要保证室内经常换气,并采取必要的防护措施,如检修过程中,工作人员带防毒面具以防止吸入中毒,戴手套、穿工作服、戴护目镜,以防止接触中毒;元件解体前,抽真空并用压缩空气吹尽元件内的残存气体和粉尘;定期对气体取样分析过滤等。②要求加工精度高,要求检修安装水平高,密封性能要求高。六氟化硫气体对电场的均匀性很敏感,故要求导电体和壳体内部所有带电部分等的加工精度要求高,一般控制在30 μm之内,电极表面应无锤痕、熔疤和焊渣。要求检修安装水平较一般电器为高,要防止水分和灰尘侵入电器内部。③外壳保护问题。气体绝缘金属封闭电器内部充有0.3~0.575 MPa压力的六氟化硫气体,若内部发生电弧接地,因封闭电器本身无断弧能力,电弧会烧穿金属外壳,或使内部压力升高造成外壳爆炸。因此,要采取保护措施,如使用内部和(或)外部过压泄放装置,实际使用过的外部过压泄放装置有防爆阀,但该阀易引起漏气;装快速接地开关,发生接地电弧时,开关快速接地,使电弧熄灭,但如何判断内部产生电弧故障比较困难;装高速继电保护等。

(黄贤鉴)

qiwen

气温 (atmospheric temperature) 表示空气冷热程度的物理量。一般以摄氏温度($t^{\circ}\text{C}$)表示,也有用华氏温度($t^{\circ}\text{F}$)表示的,在理论研究中常用绝对温度(TK)表示。三者的转换关系为

$$t^{\circ}\text{C} = 5(t^{\circ}\text{F} - 32) / 9$$

$$t^{\circ}\text{C} = TK - 273.15$$

气象台(站)地面观测中测定的是离地面1.5 m高度处的气温。测定的项目有定时气温,日最高、最低气温。

大气温度是影响天气变化的主要因素之一,故气温既是天气预报的主要内容,又是据以分析、预报其他天气现象的重要依据。水利水电建设中,混凝土坝在计算温度应力、考虑施工方法及安排工程进度时,气温也是一项基础资料。

(夏方佐)

qixiang yaosu

气象要素 (meteorological elements)

构成和反映大气状态和大气现象的基本因素。主要包括云、能见度、气压、气温、湿度、风、降水、蒸发、日照、地温、冻土及各种天气现象。各项气象要素,与农业和其他国民经济建设关系密切,也是水电站设计和施工的基础资料。

云 悬浮在大气中的小水滴、冰晶微粒或两者的聚合体。一般要观测云状、云高和云量。云状是指云的外貌;云高是指云底距地面的高度,分为低云、中云、高云;云量是指云遮蔽天空视野的成数。

能见度 视力正常的人在当时天气条件下,能够从天空背景中看到和辨认出大小适度的目标物的最大距离。在夜间是指能看到和确定出一定强度灯光的最大距离。气象台站观测的是水平能见度,目标物的仰角不宜超过6°。

日照 表示太阳照射时间长短的量。有可照时数和实际照射时数两种。太阳中心从出现在某地东方地平线到进入西方地平线,其直射光线在无地物、云、雾等任何遮蔽物的条件下照射地面的时间,称为可照时数。太阳在某地实际照射地面的时数称为日照时数。测定日照时数的仪器有暗筒式和聚焦式两种日照计。

地温 地面和地面下不同深度土壤的温度。一般气象台站观测地面温度和地面下浅层及较深层土壤的温度。地面温度指直接与土壤表面接触的温度表所示温度,包括地面及地面最高、最低温度。浅层地温包括离地面5, 10, 15, 20 cm深度的土壤温度;较深层地温包括离地面40, 80, 160, 320 cm深度的地中温度。

冻土 含有水分且温度下降到0℃或以下时呈冻



结状态的土壤。冻结层次及其上限与下限深度根据埋入土中的冻土器内水柱结冰的部位和长度测定。

天气现象 大气中的降水现象,水汽凝结、冻结现象,干质悬浮物和光电现象等。降水现象有雨、雪、霰、冰粒、冰雹等;水汽凝结冻结现象有露、霜、雨淞、雾淞等;干质悬浮物如沙尘暴、扬沙、沙尘烟幕、霾等;光电现象有雷暴、闪电、极光。此外还有大风(瞬间风速达到或超过 17 m/s)、飑(突然发作的强风,持续时间短促)、龙卷风(一种小范围的强烈旋风,破坏性强)等现象。

(夏方佐)

qiya

气压 (atmospheric pressure) 大气作用于任何表面的单位面积上的压力。气压的计量单位过去习惯上用水银柱高度表示。自 1914 年起许多国家改用力的单位毫巴 (mbar) 计量,一个标准大气压 (760 mm Hg) 等于 1013 mbar。1982 年 1 月世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 采用帕 (Pa) 作为气压单位,并以百帕 (hPa) 为基本单位。1984 年 2 月中国的气压计量单位也改用百帕,1 百帕 (hPa) = 1 毫巴 (mbar)。

测定气压的仪器主要用动槽式和定槽式水银气压表。要求连续记录气压变化的可用自记气压计。根据气压表读数计算本站的气压,要进行仪器、温度和重力差的订正。盒式气压表比较简单,常在野外查勘时用。

气压随高度按对数规律减小。近地面层气压随高度的递减率约为每 10 m 降低 1 hPa。随高度的升高,空气密度减小较快,递减率也随之减小。温度变化会引起空气膨胀、流动,改变其密度。受热多的地区,气压降低;受热少的地区,气压升高。因此地球表面气压随地区、时间而变。根据各地测定的气压,绘制订正到海平面的平均气压分布图,可供分析大气环流的特征及其变化之用,对天气预报具有实用意义。

(夏方佐)

qishi xishu

汽蚀系数 (coefficient of cavitation) 反映水轮机汽蚀性能好坏的技术指标,汽蚀系数越大,汽蚀性能越坏。以 σ 表示。

水轮机理论汽蚀系数为

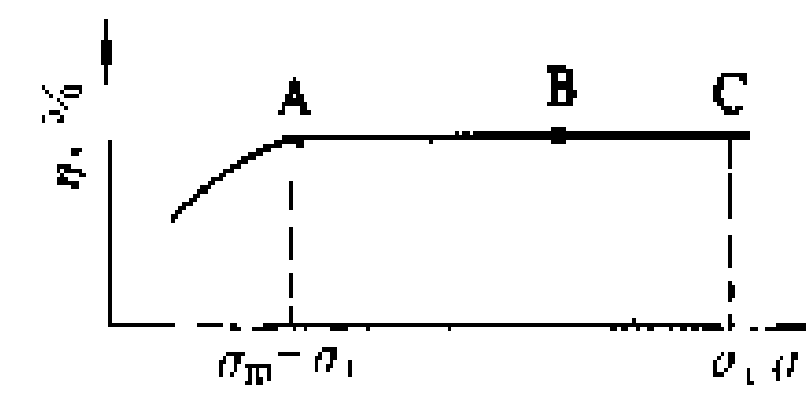
$$\sigma = \frac{w_x^2 - w_2^2 + v_2^2}{2gH} - \xi$$

式中 w_x 、 w_2 为转轮叶片上最低压力点 x 和出口处水流的相对速度, m/s; v_2 为水轮机出口流速, m/s; g 为重力加速度; H 为水头, m; ξ 为尾水管的相对损失。

模型汽蚀系数 水轮机的模型汽蚀系数难于用理论计算方法准确求得,一般是利用模型转轮在汽蚀试验台上用降低尾水箱内真空度即改变 H_v 的方法试验测得,其数值与测量数据的关系式为

$$\sigma_m = \frac{H_s - H_v - H_v - H_{v0}}{H}$$

式中 H_s 为水气压力; H_v 为水轮机吸出高度; H_v 为水的饱和蒸汽压力; H 为工作水头; H_{v0} 是尾水箱内的真空。 σ_m 是根据图中效率突降工况点 A 来确定的。实际上在 B 点往往已经发生汽蚀但强度不大,水轮机的外部特性尚无影响。通常



汽蚀特性图

即取 A 点为模型汽蚀系数又称临界汽蚀系数 σ_c 。近年来,已开始采用初生汽穴作为模型汽蚀系数,如图中 C 点,即利用闪频仪观测叶片低压区开始出现第一个汽泡时的汽蚀系数 σ_c 。

水轮机的模型汽蚀系数 σ_m 与水轮机的型式和比转速 n_s 有关,其相互关系国内外都总结有经验公式,下面列出两个有代表性的经验公式。

中国哈尔滨大电机研究所提出

$$\sigma_m = 0.035 \left(\frac{n_s}{100} \right)^{1.5}$$

美国垦务局 1976 年提出

$$\sigma_m = 0.0342 \left(\frac{n_s}{100} \right)^{1.233}$$

水轮机的装置汽蚀系数 在实际工程中存在各种误差因素,外部条件也不相同,如河流水质、运行方式等都使模型汽蚀系数难于在工程中直接引用。为使水轮机运行安全可靠,实际应用上都将模型汽蚀系数乘以汽蚀裕量系数 K ,面得水轮机的装置汽蚀系数 σ_p ,即

$$\sigma_p = K \sigma_m$$

根据设计、制造和运行经验, K 一般取为 1.2~1.5,对水流含沙量和含气量大、转轮叶片等材料采用一般碳钢制造、机组经常偏离最优工况运行等情况, K 要取较大值以至最大值。

通过大量实际电站统计,各国都以其自身经验总结出不少水轮机装置汽蚀系数与 n_s 关系的经验公式,下面列出几个有代表性的公式

$$\sigma_p = 8 \times 10^{-6} \times (n_s + 20)^2 \quad \text{1979 年中国哈尔滨大电机研究所提出}$$

$$\sigma_p = 2.56 \times 10^{-5} \times n_s^{1.64} \quad \text{1971 年美国垦务局标准}$$

$$\sigma_p = 0.0477 \left(\frac{n_s}{100} \right)^{1.732} \quad \text{日本 IEEJ 技术报告 No. 30}$$

$$\sigma_p = 3.19 \times 10^{-6} \times n_a^2 \quad \text{苏联}$$

$$\sigma_p = 8 \times 10^{-6} \times n_a^{1.4} \quad \text{1978 年瑞典通用电气公司 (青长庚)}$$

qishiba

砌石坝 (masonry dam) 用石料砌筑而成的坝。其主要优点有：①就地取材；②比混凝土坝节约水泥和木材；③工程量比土石坝少；④泄洪和导流布置较土石坝简单，安全度也较高；⑤施工技术简单。它的主要缺点是耗用劳动力较多，难以用机械化方法施工，工期较长，欧美等发达国家已很少采用这种坝型，但发展中国家仍修建这种坝。砌石坝按坝型分为砌石重力坝、砌石拱坝和砌石支墩坝；按砌筑方法可分为干砌砌石坝和浆砌砌石坝，当代砌石坝多为浆砌砌石坝。

很早以前人类即用砌石筑坝。中国最古老的、迄今仍在运行中的砌石坝有：公元前 250 年左右在四川省都江堰枢纽上建成的干砌卵石分水堰；公元前 219 年在灵渠（湘桂运河）上建成的干砌块石和卵石溢流坝。1949 年以后，中国修建了很多座砌石坝，尤以砌石拱坝发展很快。据 1980 年的不完全统计，中国已建高 15 m 以上的砌石坝 1315 座，正在施工的 383 座。在已建砌石坝中，砌石拱坝 746 座，占总数的 56.7%；砌石重力坝 411 座，占 31.3%；砌石支墩坝及其他坝型 158 座，占 12%。

砌石材料 坝体石料应质地均匀，没有裂缝，不易风化，其饱和抗压强度不低于 30~40 MPa，吸水率一般不超过 10%。常用的石料有毛石、块石和条石。砌筑方法可分为干砌和浆砌两种。浆砌时常用的胶凝材料为水泥砂浆，也有采用小石子水泥砂浆、细骨料混凝土、水泥石灰砂浆、水泥粘土砂浆和其他材料的。

构造特点 砌石坝的设计和计算基本上与混凝土坝相同。砌石体的物理力学指标主要取决于胶凝材料和砌筑密实度。由于石料间的砌缝很难填筑密实，需在坝体上游面或靠近上游部分设置防渗层，如混凝土防渗面板、钢丝网水泥喷浆护面、水泥砂浆勾缝和其他防渗层。与混凝土坝不同，砌石坝一般不设纵缝和横缝，当设横缝时，缝的间距较大；通常也不采取降温散热措施。

砌石坝实例 印度的纳加琼纳萨格 (Nagarjun-sagar) 砌石重力坝坝高 125 m，坝体体积 561 万 m³，是世界上最高和坝体方量最大的砌石坝。中国最高的砌石重力坝为河北省朱庄水库的砌石坝，坝高 95 m。世界上最高的砌石拱坝是中国河南省群英浆砌石重力拱坝，高 101 m。中国山东省东风浆砌石双曲拱坝，坝高 84 m，宽高比 0.16。20 世纪 70 年代以来，中国还

兴建了很多新型砌石坝，如湖南省岩屋潭砌石空腹重力坝（高 66 m），浙江省大溪垄干砌石溢流坝（高 27 m）和河北省小龙潭浆砌石框格填碴重力坝（高 39.6 m）等。

(郑顺炜)

Qiantang Jiang shuixi shuinneng ziyuan

钱塘江水系水能资源 (hydropower resources of Qiantang river system) 据 1980 年《中华人民共和国水力资源普查成果》统计，钱塘江水系理论蕴藏量为 230.25 亿 kW·h/a，占中国的 0.4%；其中可能开发水能资源（见水能资源）60.38 亿 kW·h/a，占中国的 0.3%。

钱塘江为浙江省第一大江，发源于浙江、安徽、江西 3 省交界处。干流衢州以上称常山港，衢州至兰溪称衢江，兰溪至梅城称兰江，梅城至桐庐称桐江，桐庐至闻家堰称富春江，闻家堰至闸口称钱塘江。钱塘江流域面积 4.17 万 km²。干流长 424 km，落差约 720 m，多年平均年径流量 404 亿 m³。

钱塘江水系支流众多，水能理论蕴藏量 1 万 kW (0.876 亿 kW·h/a) 以上的各级支流有 43 条，水能资源较分散。干流水能理论蕴藏量 31.11 亿 kW·h/a，仅占全水系的 13.5%。水能理论蕴藏量大于 10 万 kW (8.76 亿 kW·h/a) 的支流有江山港、乌溪江、新安江、分水江等 4 条河流，水能理论蕴藏量 50.44 亿 kW·h/a，占水系的 21.9%。其余的 2/3 的理论蕴藏量分布于其他支流中。

干流衢州以上河段属山溪河流，径流量较少。衢州至三河埠流经金衢盆地，为浙江省重要的粮食与经济作物区，难于布置调节水库，水能资源开发的条件较差。三河埠至七里泷为峡谷河段，是干流资源开发条件最好的河段，已建有富春江水电站，装机容量 29.72 万 kW，平均年发电量 9.23 亿 kW·h。七里泷以下为感潮河段，没有开发条件。

水能资源开发条件较好的有乌溪江和新安江，已建有湖南镇、黄坛口和新安江 3 座大中型水电站，总装机容量 86.25 万 kW。以上 4 座已建水电站装机容量占全水系可能开发水电站总装机规模的 57.9%，占单站装机 1 万 kW 以上水电站总装机规模的 79.2%，尚待开发的主要是小型水电站。

(赵毓昆)

qiaoxing jiaxian

桥形接线 (bridge-type connection) 两个高压侧设有断路器的变压器-线路组接线中间加一连接桥断路器的电路。按连接桥断路器的位置，可分为



外桥形、内桥形和双外桥形、双内桥形四种接线,见图所示。

外桥形接线 连接桥断路器接在线路断路器的外侧,其他两台断路器接在变压器回路中,见图(a)。

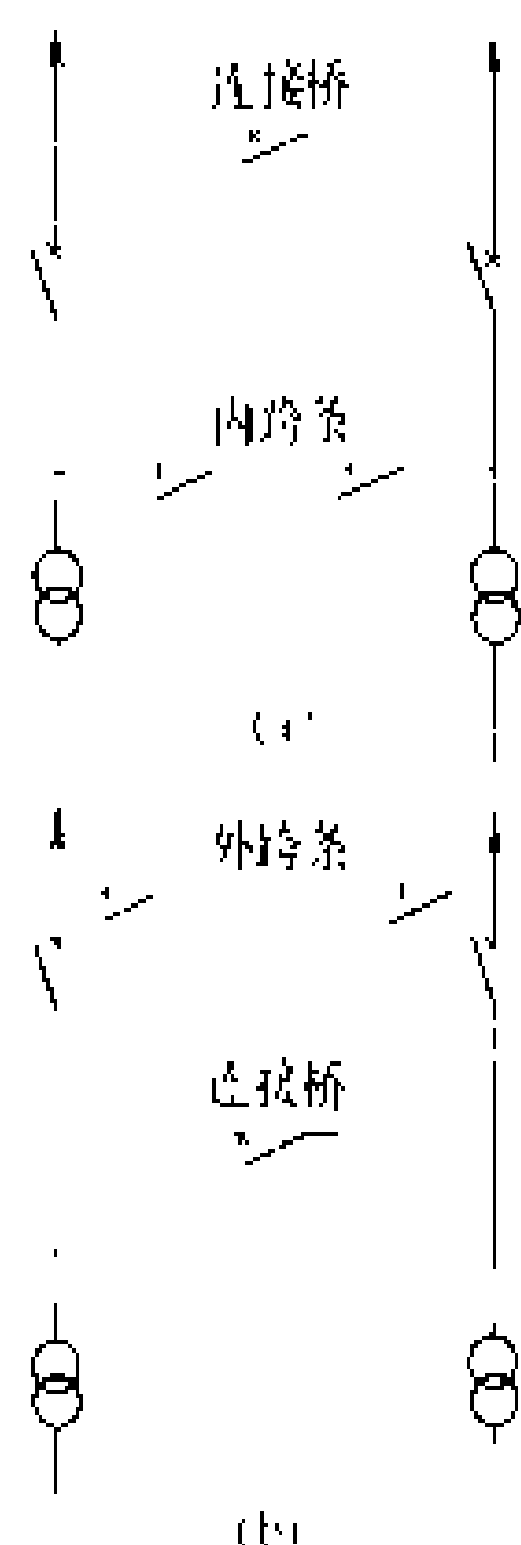


图1 桥形接线图

(a) 外桥形接线;

(b) 内桥形接线

优点是:①接线简单,高压断路器数量少。②开关站布置较简单,占地面积小。③主变压器的投入或切除比较方便,并且一台主变压器故障,只断开一台断路器,不影响线路和另一台主变压器的运行。缺点是:①变压器回路的断路器故障或检修,使电站一半机组停电。连接桥断路器故障则全站需短时停电。②一回线路故障,需暂时影响电站一半功率送出,且同时开断两台断路器。拉开线路侧隔离开关后,电站全部功率可由一回线路送出。③连接桥断路器检修时,两回线路需解列运行。如有穿越功率通过时将受影响。④变压器回路断路器

检修或故障,将停运变压器。为了在检修变压器回路的断路器时不中断变压器的正常运行,可加装正常开断运行的跨条,跨条上装两组隔离开关和电流互感器,以满足运行操作和继电保护要求。但若此时任一组变压器回路故障,都将使全站停电,且断路器要满足并联开断的要求。

这种接线一般适用于担负系统调峰任务,变压器切合频繁,或出线线路较短、没有穿越功率的电站。

内桥形接线 连接桥断路器接在线路断路器的内侧,其他两台断路器接在线路上,见图(b)。优点是:①接线简单,高压断路器数量少。②开关站布置较简单,占地面积小。③线路的投入或切除比较方便,并且当线路发生故障时,仅故障线路的断路器断开,不影响其他回路运行。缺点是:①变压器回路故障,使电站一半机组停电。连接桥断路器故障,则全站需短时停电。②一台变压器故障,同时开断两台断路器,并切除一回线路。经隔离开关操作后,电站一半功率可向两回线路送电。③连接桥断路器检修时,两回线路需解列运行,如有穿越功率通过时将受影响。④线路侧断路器检修或故障将停运线路。为了在检修线路侧断路器时不中断线路的正常运行,也可加装正常断开运行的外跨条。但若此时任一回线路故障,都将使全站停电,且断路器要满足并联开断的要求。⑤变压器正常操作时影响穿越功率。

这种接线一般适用于主变压器不经常切合或线路较长的电站。当线路位于高雷电日地区,线路故障率较高时,一般也采用此种接线。

双内(外)桥形接线 有两个连接桥断路器,即除

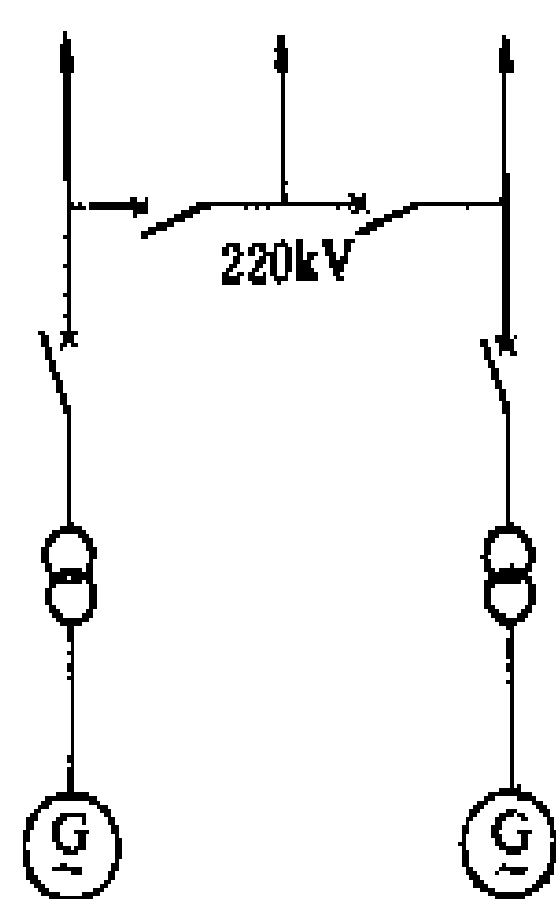


图2 中国碧口水电站
双外桥形接线简图

两个变压器-线路组接线外,在两个连接桥断路器之间跨接一回线路或一台变压器。此种接线也分双内桥形接线和双外桥形接线。例如中国碧口水电站 220 kV 侧进线两回(电站装机 3×100 MW,两台机接至 220 kV 侧)、出线 3 回即采用了双外桥形接线,将一回出线跨接在两个连接桥断路器之间,见图 2。但当此线路故障时,机组虽可不停电,但电站已解列运行。

(潘天缘)

Qingtongxia Shuili Shunlu

青铜峡水利枢纽 (Qingtongxia Hydroproject)

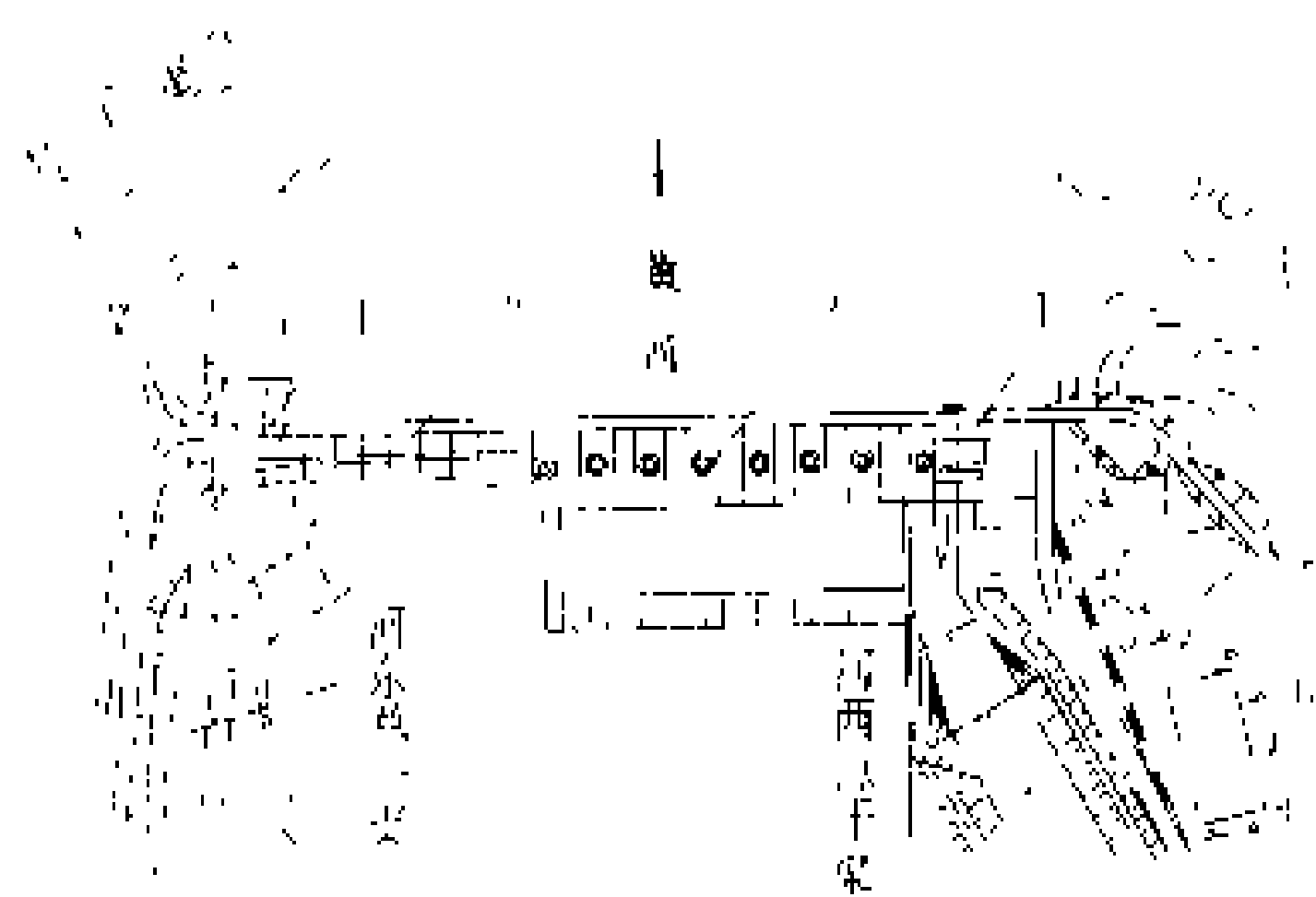
位于宁夏回族自治区首府银川市以西 80 km、黄河青铜峡出口处,以灌溉为主,结合发电、防凌等,具有综合利用效益。电站设计装机容量 272 MW,保证出力 87.6 MW,多年平均年发电量 13.5 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,以 110 kV 电压向银川市供电。灌溉引水最大流量 $630 \text{ m}^3/\text{s}$,灌溉面积 600 万亩。大坝为混凝土重力坝,坝顶高程 1160.2 m,最大坝高 42.7 m。工程于 1958 年 8 月开工,1960 年 2 月截流,1967 年第一台机组发电,1978 年竣工。现正在左岸岸边扩建一台 36 MW 机组。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 27.5 万 km^2 ,多年平均年径流量 324 亿 m^3 ,多年平均流量 $1028 \text{ m}^3/\text{s}$ 。水库正常蓄水位 1156 m,死水位 1155.5 m,设计总库容 6.06 亿 m^3 ,现存库容 0.56 亿 m^3 。电站设计洪水标准为:百年一遇设计,千年一遇校核。设计洪水流量 $7500 \text{ m}^3/\text{s}$,相应水位 1157 m,校核洪水流量 $9280 \text{ m}^3/\text{s}$,相应水位 1158.8 m。电站最大水头 21 m,最小水头 16.4 m,设计水头 18 m。

枢纽布置 挡水建筑物前沿总长度 591.85 m,自左至右为副厂房坝段 91.5 m,溢流坝与闸墩厂房坝段 262.35 m,挡水坝段 160 m,泄洪闸坝段 42 m,右岸挡水坝段 36 m。枢纽由坝、闸墩厂房、副厂房、开关站、泄洪闸、河东总干渠、河西总干渠和高干渠等组成,见图。

闸墩式厂房为半露天布置,每个闸墩内安装 1 台

竖轴转桨式水轮发电机组。每个机组段设有1~2个排沙底孔,以减少水库淤积和过机泥沙。半门式起重机布置在坝顶,在机组安装、检修时,用以起吊搬运厂内重件。1~7号机组单机容量为36 MW,水轮机转轮直径5.5 m,额定转速107 r/min,发电机为半伞式空冷型,额定电压10.5 kV,定子铁芯内径9 m。8号机单机容



青铜峡水利枢纽平面布置图

1—副厂房坝段; 2—溢流坝与闸墩厂房坝段; 3—挡水坝段; 4—泄洪闸坝段; 5—右岸挡水坝段; 6—开关站

量20 MW,水轮机转轮直径5 m,额定转速125 r/min,发电机为半伞式空冷型,额定电压10.5 kV,定子铁芯内径7 m。1号机尾水排入河西总干渠,2~7号机尾水排入黄河主河道,8号机尾水排入河东总干渠。

灌溉渠首分设左、右两岸。左岸河西渠首引入河西总干渠,即清代开建的唐徕渠,引水高程1136 m,引水流量400 m³/s。右岸河东渠首引入河东总干渠,即有名的秦渠和汉渠,引水高程1136 m,引水流量100 m³/s。上游有高干渠,底坎高程1151 m,引水流量24 m³/s。

泄洪设施 7孔溢洪道采用面流消能方式,堰顶高程1149.4 m。其中2孔的孔口宽14 m,高8 m;其余5孔的孔口宽14 m,高7.5 m。总计最大泄量3255 m³/s。泄洪闸3孔,底坎高程1140 m,孔口宽10 m,高5.5 m,最大泄量2205 m³/s。1~7号机组段,每台机组有泄水排沙孔2孔,孔口宽6.5 m,高1.5 m,底坎高程1124 m;8号机组段有1孔,孔口宽4 m,高2 m。15孔排沙孔总计最大泄量2240 m³/s。8台机组最大引用流量1860 m³/s。

运行效益 青铜峡水电站自投产以来,充分发挥了灌溉和发电效益。1968年水库蓄水运用初期,宁夏回族自治区粮食总产量仅4.78亿kg。青铜峡水库建成后,灌溉面积不断扩大,到1984年,粮食总产量已达到11.3亿kg,净增1.36倍。

设计和施工单位 西北勘测设计院设计,水利电力部第三工程局施工。

(李维藩)

qingwuj

清污机 (trashrack cleaning machine)

清除拦污栅栅面上淤积物的机械设备。清污机主要有齿耙式、回转栅式、竖直抓斗式和压污耙式四类。①齿耙式清污机又称耙斗式清污机。系利用可张、合的齿耙沿拦污栅面上下移动来抓取污物;由清污耙、操作机构和车架组成;车架可做成固定的,也可做成移动的。耙至顶部的污物由专用设备运走。这类清污机广泛应用于水电站机组进水口。使用在中国云南西洱河二级水电站进口的耙斗式清污机,经多年运行,效果良好。②回转栅式清污机。由带钩的拦污栅片组成若干组回转式链板,通过驱动机构的带动,使栅片作旋转运动来挂取污物。这类清污机适用于污物来量大的中小型水电站进水口。中国新疆玛纳斯河梯级电站进水口的回转栅式清污机,清污捞冰效果良好。③竖直抓斗式清污机或称鐐式清污机是用抓斗来抓取栅前堆积较大的杂物的机械设备。④压污耙式清污机主要借助压污耙的重量或外加压力,将栅面上淤积物沿栅面刮至栅底坎以下位置,再借设在栅孔下部的排污底孔将污物冲走。

(张培德)

Qiuji'er Pubu Shuidianzhan

丘吉尔瀑布水电站 (Churchill Falls Hydro-power Station)

位于加拿大拉布拉多半岛纽芬兰省哈密尔顿(Hamilton)河(又名丘吉尔河)上,装机容量5428 MW,年发电量345亿kW·h。大部分电力售给相邻的魁北克省,用735 kV特高压输电线路3回送至蒙特利尔,距离1300 km。电站为引水式。通过2.1 km的隧洞取得约300m的水头。工程于1967年8月开工,1971年12月首批2台机组发电,1974年9月建成,总工期7年零1个月。

水文和水库特性 坝址以上流域面积6.93万km²,多年平均年径流量439亿m³。正常蓄水位448.6 m,总库容334亿m³,调节库容283亿m³,库容系数 β_1 为0.64,可进行多年调节。设计洪水标准为万年一遇,洪峰流量17000 m³/s。校核洪水采用可能最大洪水,洪峰流量30600 m³/s。电站利用哈密尔顿河上高75m的丘吉尔瀑布以及上下游急滩的集中落差,最大水头322 m,设计水头312.5 m。正常尾水位129.3 m。

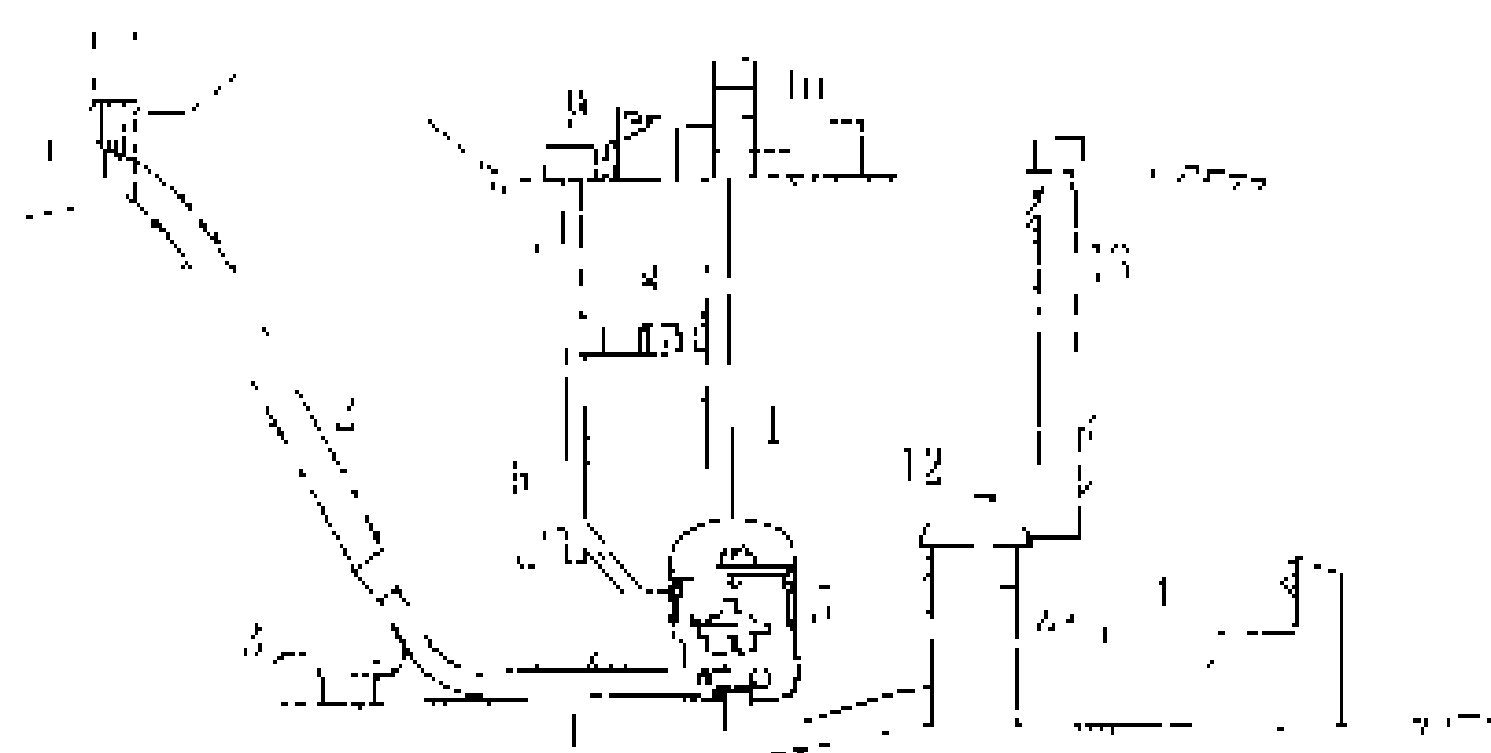
枢纽布置 建低坝抬高原有湖泊水位,并从相邻河流上游引水,共建主副坝88座,总长64 km,平均坝高9 m。前池坝最大坝高36.5 m,建有4座控制闸和2座溢洪道,总泄流量22300 m³/s。

电站的主要建筑物为复杂的地下式厂房和引水系统,见图。进水口至发电厂房有11条压力斜洞,每条长427 m,上段用混凝土衬砌,洞径6.1 m,下段用

钢板衬砌, 钢板厚 38~44.5 mm, 洞径 4.3 m。斜洞四

共计 13.1 亿加元, 单位投资 250 加元/kW。

(陆钦侃)



丘吉尔瀑布水电站地下式厂房系统剖面图

1—进水口; 2—混凝土衬砌压力斜洞; 3—施工洞; 4—钢板衬砌高压洞; 5—主厂房; 6—变压器室; 7—电缆井; 8—防火储水室; 9—开关站; 10—控制及管理楼; 11—交通洞; 12—尾水调压室; 13—通气井; 14—尾水洞

周岩石采用高压灌浆处理。主厂房洞室长 300 m, 宽 25 m, 高 50 m。主厂房上游侧设变压器洞, 长 261 m, 宽 15.2 m, 高 11.9 m。下游侧设尾水调压室, 长 233 m, 宽 15.9 m, 高 45 m。下接 2 条不衬砌的尾水洞, 各宽 13.7 m, 高 18.3 m, 长 1690 m。厂房区基岩为变质花岗片麻岩, 厂房埋深 256 m。开关站和电站的控制管理楼设在地面。

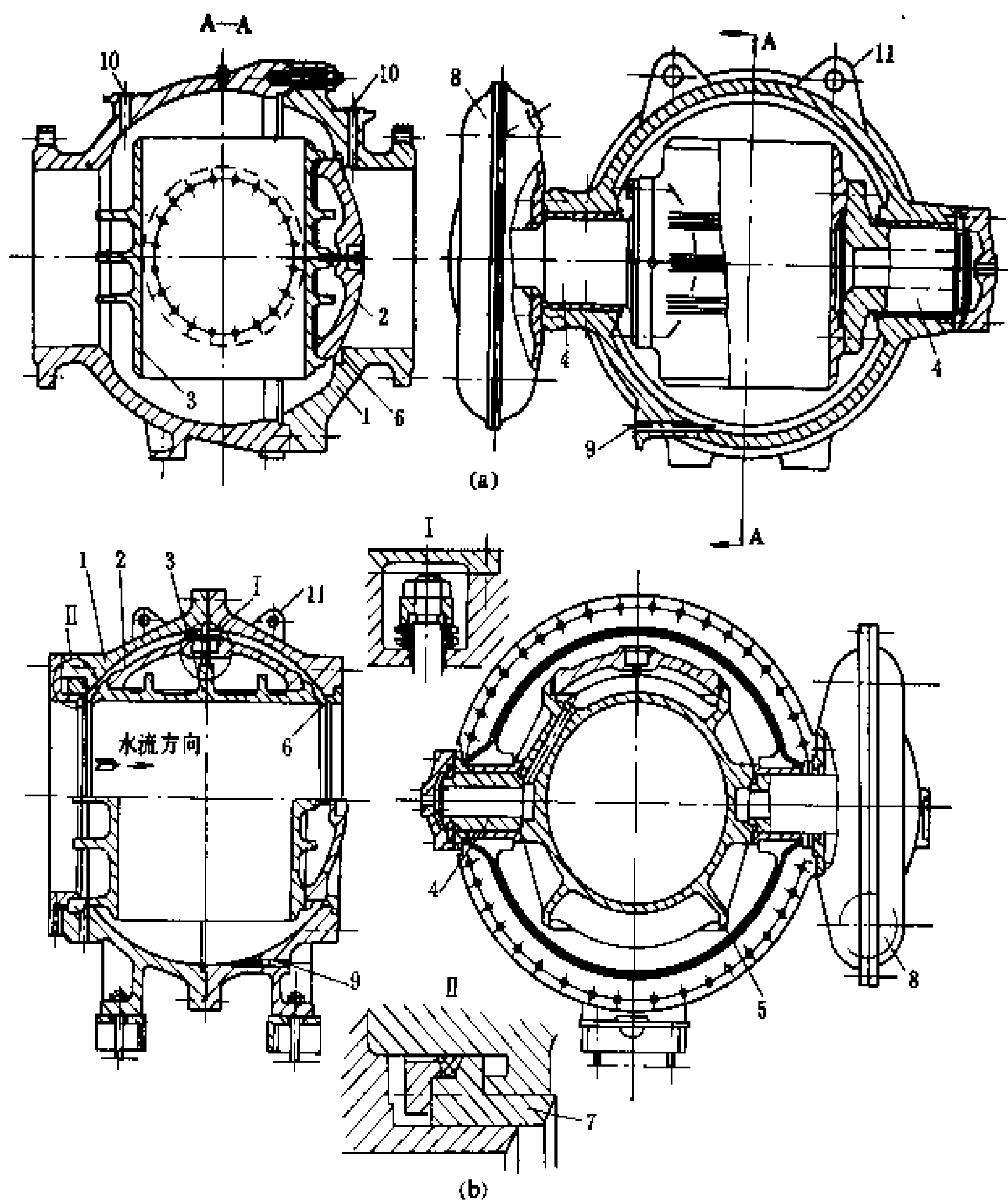
机电设备 地下厂房内安装 11 台高水头混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径为 6 m 和 6.1 m, 转速 200 r/min, 出力 475 MW 和 500 MW。发电机额定容量 500 MV·A, 功率因数 0.95 和 1.0, 电压 15 kV。发电机出线通过斜洞引至容量为 500 MV·A 的一次变压器, 升压至 230 kV。经过 230 kV 母线引出 6 条电缆, 由电缆并接至地面容量为 1000 MV·A 的二次变压器组, 升压至 735 kV 后送出。

工程量和投资 土方填筑 2021 万 m³, 地下石方开挖 300 万 m³, 混凝土浇筑 15.6 万 m³。1967 年估算工程总投资 9.5 亿加元, 远距离送变电投资 3.6 亿加元,

qiufa

球阀 (rotary valve; spherical valve) 装在水轮机前引水钢管上, 活门成球形的阀门。一般用于水头大于 200 m 的水轮机上。由于它的活门为圆筒形, 内径和钢管直径相同, 过流时水力损失接近于零, 因此特别适用于流速高的场合。现代球阀一般都采用卧轴球阀。立轴球阀因结构复杂, 下端轴处因积沙易卡, 已被淘汰。球阀由阀壳、活门及端轴、密封装置、操作机构、附属设备组成。

阀壳 阀壳可采用不可拆的焊接结构, 其尺寸小、重量轻。多数阀壳为分半结构, 一种为对称分半, 分半面在转轴中心线上, 其分半面螺栓受力大而不均; 另一种是偏心分半, 分半面偏下游侧, 其分半面螺栓受力小



球阀

(a) 单面密封球阀 (偏心分半); (b) 双面密封球阀 (对称分半)

1 阀壳; 2—工作密封盖; 3—活门; 4—端轴; 5—环形密封面; 6—下游密封面; 7—上游检修密封圈; 8—环形接力器; 9—排沙孔; 10—旁通管; 11—吊耳



而均匀。阀壳常用铸钢制造,也可用锻钢焊接加工而成。

活门与端轴 活门呈圆筒形,长度略大于直径,两侧壁中部各有一端轴支承在阀壳的轴孔中,全开时圆筒正对引水钢管,全关时圆筒转 90° ,靠圆筒壁上的工作密封盖和阀壳下游密封面止水。有的没有密封盖,而采用环形密封面。

密封装置 球阀有单面密封的和双面密封的,见图。单面密封只在下游侧有工作密封,用密封盖和阀壳下游密封面止水,也有用阀壳下游工作密封圈和活门上的环形密封面止水。单面密封球阀为了在不放空压力钢管的情况下检修工作密封,需在上游再装一个检修球阀。双面密封球阀,下游侧有工作密封,阀壳的上游侧还有检修密封圈作为检修密封,必要时可用检修密封止水,检修工作密封。有的双面密封球阀的活门可转 180° ,以便将活门上的两个环形密封面调换使用。密封盖或密封圈一般用钢管压力水操作,滑动面用不锈钢制作,固定、活动止水面常用硬度不同的不锈钢制成,精加工后研磨啮合,在水压作用下能不漏水。

操作机构 小型球阀常用手动或电动操作。大中型球阀均用液压操作。当水压足够,水质清洁时可用钢管水压操作,可靠性高,但水应经沉淀过滤,操作系统采取防锈措施,并要有备用压力水源。大多数情况下采用油压操作。液压操作机构有环形接力器、刮板接力器、套筒接力器、摇摆接力器等几种。环形接力器外形尺寸大,加工困难,精度要求高,易变形,易渗漏,对油操作的油水易混合。刮板接力器尺寸小,结构紧凑,但零件多,加工精度要求高。套筒接力器活塞尺寸较大。摇摆接力器结构简单可靠,尺寸小,占地面积小,渗漏少。

附属设备 一般有向下游充水的旁通阀及排气阀,为装拆球阀用的伸缩节,为排除阀壳底部积沙的排沙阀,为向密封盖内充压和泄压的供水阀和卸荷阀。

(吴次光)

quyuxing tu

区域性土 (regional soil) 分布在一定地区,在当地自然环境下形成的具有特定性状的土。岩石风化成土过程中,在不同地区,由于气温、降水、排水等环境条件的差异,通过分解、淋滤、化合和积聚等一系列物理化学变化,生成性质各异、具有新的成分和结构的土,其物理力学性质和工程特性显示出地区特点。地球上分布较广的区域性土有黄土、红土、膨胀土和冻土。这4类土在中国也有典型意义。

黄土 黄土主要分布于中纬度的干旱和半干旱地区,多集中在大陆内部,总面积有 1300万 km^2 。在中

国,黄土的分布面积有 63.53万 km^2 ,大都位于北纬 $33^\circ\sim 47^\circ$ 。黄土属于第四纪沉积物,成因有风成,水成和多种成因3种学说,其中以风成说较占优势。黄土呈黄色、褐黄色和灰黄色。垂直节理发育,能保持很高的直立陡壁。有肉眼可见的大孔隙,颗粒成分以粒径为 $0.05\sim 0.005\text{ mm}$ 的粉粒占多数(约60%以上)。富含碳酸钙盐类,粘土矿物以伊利石为主。土中粘粒连结成薄膜,包裹着粉粒,形成松散排列的土骨架。干燥时具有足够的结构强度以维持其高孔隙结构,一旦被水浸湿,土颗粒间的胶结作用被削弱以致遭到破坏,土骨架崩溃,产生湿陷变形,丧失抗剪强度。建筑工程上以湿陷系数确定黄土湿陷的强弱;以累积湿陷量划分黄土地基的湿陷等级,并据以建议处理措施。

红土 红土多分布于热带与亚热带地区。中国长江以南广大地区都有红土存在,其中以云南和贵州两省比较集中。在这些地区,温度高,降雨量大,排水条件好,岩石中的二氧化硅、碱和碱土金属在成土过程中遭到淋滤,倍半铁、铝氧化物明显积聚,最终生成红色、红棕色和以高岭石粘土矿物为主的残积、坡积红土。土中的粘粒通过颗粒表面的正、负电荷相吸和铁、铝氧化物的胶结作用,相互叠聚和连结成大小不等的稳固集合体,组成红土的特殊结构。红土的天然含水量和液、塑性限度都很高,粘粒含量大,密度低,压实性差,但压缩性属中等偏低,抗剪强度和渗透性均比一般粘性土高。在工程建设中,红土是一种良好的天然地基和工程材料。

膨胀土 膨胀土在热带和温带的半干旱地区都有发现,大多分布在年蒸发量超过年降水量的地区。膨胀土的主要粘土矿物是蒙脱石,矿物表面的负电荷、晶格间的结合强度、交换性阳离子的性质和容量等都影响其膨胀势能。凡粘性土和水相互作用时都要产生膨胀,包括水分子进入不稳定晶格而产生的晶内膨胀和颗粒表面形成水化膜而产生的粒间膨胀。从工程角度出发,只把在结构物荷重下,遇水浸湿能增加体积而对工程结构物有影响的土称做膨胀土。保持土体原始体积不变所需的压力就是土的膨胀力,在表面无载荷情况下浸水膨胀的百分比称膨胀量,被用作评定膨胀势能的指标。膨胀土经过浸水膨胀和干燥收缩的循环作用,膨胀量将随循环次数的增加而减少,抗剪强度一再削弱。膨胀土的膨胀和收缩都可能对工程产生破坏作用。

冻土 冻土分为永冻土和季节性冻土。全球范围内,永冻土有 3500万 km^2 。中国的东北和西北地区除分布季节性冻土带外,在大小兴安岭北部、青藏高原、天山和阿尔泰山区也有永冻土区。含水的土冷却到 0°C 以下时,土孔隙中的水结成冰。土中的水结冰时体积膨胀,使土体产生冻胀。其影响因素主要有土类、含

水量、温度和压力。在天然条件下,冻土按冰的胶结程度分为坚硬冻结、塑性冻结和松散冻结,各自的力学特性有很大差异。冻土有较高的瞬时强度,但长期强度却相当低。冻土融化时产生附加沉降,称为融沉,并丧失大量强度。季节性冻土的冻胀和融沉,伴随水分转移,极易使工程遭受破坏。

参考书目

Proceedings of the International Conference on Engineering Problems of Regional Soils. Beijing: International Academic Publishers, 1988

(卞富宗)

quanxi sanban shuigong jiegou moxing shiyan

全息散斑水工结构模型试验 (holography and speckle technique in hydraulic structural model test)

用全息及散斑技术进行水工结构模型试验,以取得结构的变形、应变或应力数据的实验技术。由于这种方法测量精度高,对模型材料无特殊要求,且具有非接触测量的特点,其应用较广,是一种重要的结构分析方法。它大体上可分为激光全息技术和散斑干涉技术两大类,除一般应力分析外,都可应用于断裂力学,测定裂纹尖端张开位移及应力强度因子。脉冲全息技术的发展使瞬态变形及应力波传播规律的研究成为可能。

激光全息技术 利用全息照相原理,用扩束成平面波的激光照射结构模型表面,在结构受载变形前后分别曝光记录在全息底片上,当用激光波照射已显影处理的底片时,再现的模型干涉条纹图象就具有变形或应力的信息。该技术有不同的实验方法。如:①全息干涉法,能获得结构的三维变形场。②时间平均法,可研究结构的三维振型及自振频率。③全息光弹法,能得到结构平面模型的主应力等和线条纹($\sigma_1 + \sigma_2 = \text{常数}$, σ_1 、 σ_2 分别为最大、最小主应力),用以分离应力。近年来应用激光全息技术研究了各种型式大坝的变形和应力状态,分析了拱坝及厂房结构的三维振型与振动应力,预估地下结构围岩破裂区,以及研究激光波作用下大坝的防护等。

散斑干涉技术 用激光波照射结构模型表面,其漫反射的光波相互干涉形成无数明暗相间的散斑,用白光照射经处理的结构表面时也能形成类似的散斑,这些散斑都带有结构变形的信息,可用于高精度(小于 1μ) 的变形测量。采用错位(剪切)散斑法,还可获得模型的全场应变条纹图。将散斑技术与全息法相结合,可研究结构的三维应力场。利用微闪技术,能分析振动问题及瞬时位移场。散斑干涉技术因其设备简单,通用性强,常用于水工结构模型的静态、动态变形研究及稳定分析,评估地下洞室围岩开挖的影响与稳定性问题。

(沈星源)

R

ren'gong guliào

人工骨料 (crushed aggregate) 用岩石或卵石经人工破碎和筛分而制成的混凝土骨料。其粗粒料常称碎石骨粒, 粒径范围一般为 5~150 mm。细粒料常称人工砂, 其粒径一般小于 5 mm。

碎石骨料颗粒表面粗糙、体形不圆并具有楞角和扁平面, 拌制的混凝土一般比天然骨料(卵石)拌制的和易性差, 用水量多, 水泥用量较大。但碎石骨料拌制的混凝土, 其抗压强度高。人工骨料的粒径、细度模数和级配是按设计需求生产的, 质量较容易满足设计要求。生产过程中的废弃料少。

水电站工程常设置专用的采石场或部分利用工程施工中开挖出的石渣来生产人工骨料。选择采石场应根据石料质量及开采的技术经济条件确定, 如岩性、料层厚度、埋藏状况、剥采比(即料场开采中, 剥除覆盖层等废弃料数量与开采的获得量之比值)以及交通运输条件等。石灰岩的强度适中、温度线膨胀系数较小是生产人工骨料较好的材料。

(章景安)

rú kù hóng shuǐ

入库洪水 (reservoir inflow flood) 从水库周边汇入水库及由库面降雨所形成的洪水。入库洪水由 4 部分组成(见图 1): ①干流入库站(A 站)的洪水过程; ②支流入库站(B 站及 C 站)洪水过程; ③区间(A, B, C 站至坝址区间)入流过程; ④库面降雨过程。

建库后, 进入水库的洪水与天然坝址处的洪水, 由于形成条件的变化及洪水的地点不同, 存在一定的差别, 表现为: ①坝址天然洪水是经过库区河槽调蓄, 汇流到坝址断面; 建库后, 入库洪水是由水库周边汇入水库的洪水, 不经过

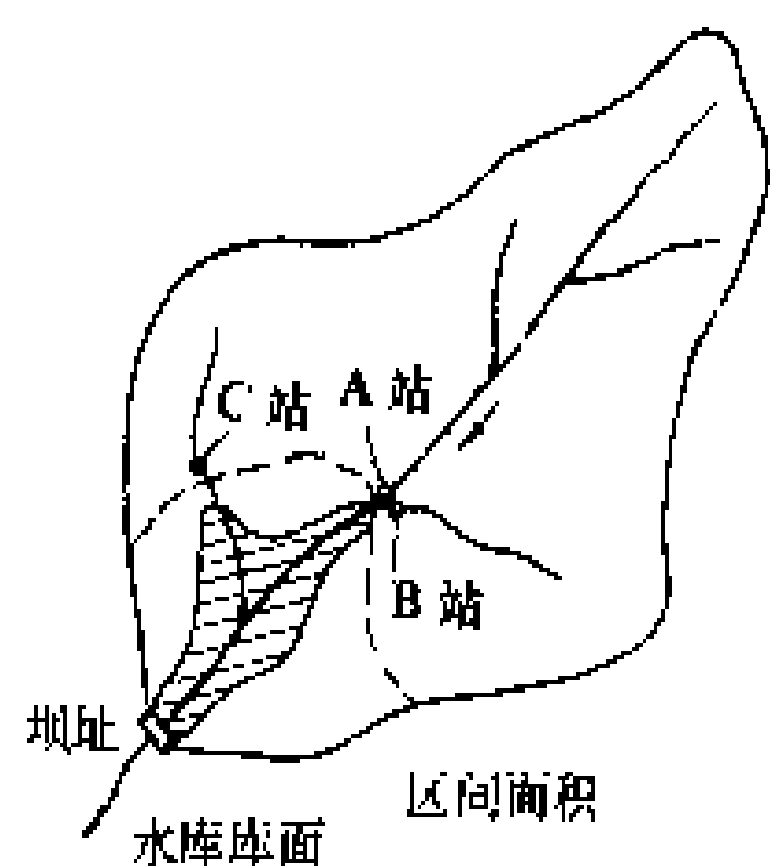
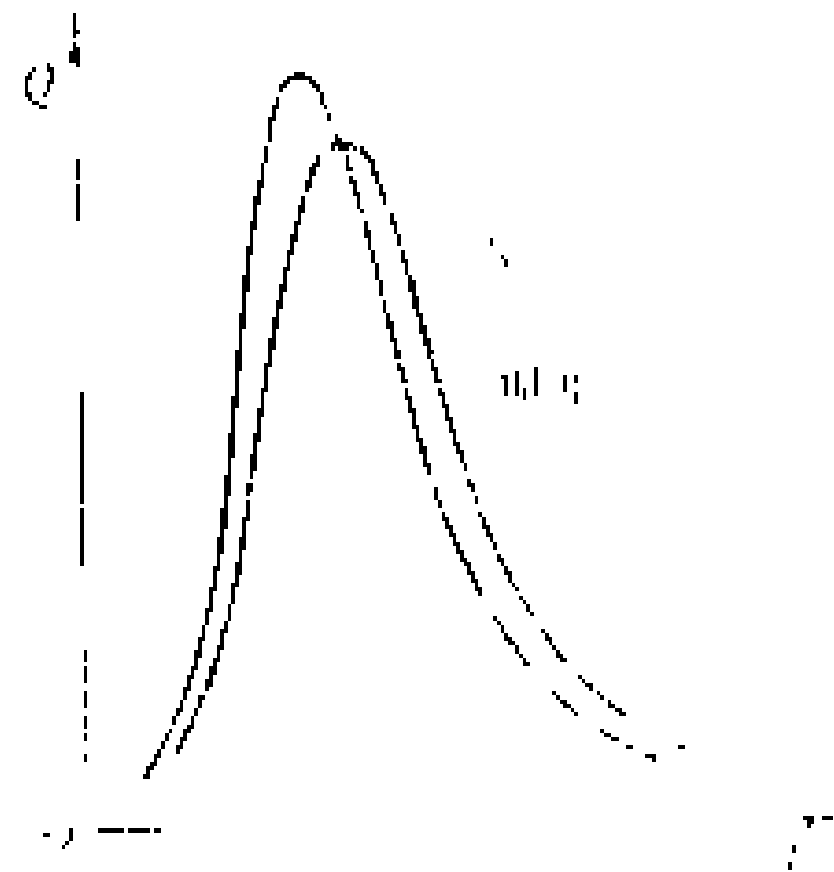


图 1 入库洪水汇流简图

库区河槽调蓄。②建库后, 水库淹没区由原来的陆面变为水面, 陆面降雨和蒸发变为水面降雨和蒸发, 改变了库区降雨的产流、汇流条件。③由于洪水波在库区传播速度加快, 区间洪水与干流洪水的遭遇有可能改变。这些变化造成建库后的入库洪水比坝址天然洪水洪峰增高, 涨水段洪量增大, 洪峰出现时间提前, 见图 2。



为配合水库调洪计算, 入库洪水可分为分散型与集中型两种。分别给出上述 4 部分洪水过程线的称分散型入库洪水, 适合用水力学不恒定流方程组计算库区洪水演进。当用水文学水量平衡法进行水库调洪时, 需将分散型入库洪水合成为集中型入库洪水。

(唐友一)

ruǎnjī chǔlǐ

软基处理 (treatment of soft dam foundation) 对软弱坝基进行防渗及加固处理的工程措施。软基是相对于岩基而言的, 由各种松散材料构成, 包括砂砾石、砂、粘性土及各种特殊土类。一般来说, 砂砾石和砂土坝基的强度和变形性质易于满足要求, 对其处理主要是渗流控制。软弱粘性土坝基是低透水性的, 主要是加固处理, 以提高其强度和减小其压缩性。此外还有一些特殊软基的处理, 如易液化的饱和松砂和少粘性土的防止液化处理、湿陷性黄土坝基的防止湿陷变形处理等。

砂砾石坝基的渗流控制 其基本形式有上游防渗铺盖、垂直防渗设施及下游反滤排水设施, 以及上述各种设施的综合作用。

上游防渗铺盖 将防渗土料覆盖在上游透水坝基表面, 形成防渗铺盖, 以有效地减小渗流量和渗透压力。它常结合下游排水反滤设施一起使用, 以控制渗透压力和保证渗透稳定, 但其防渗效果有一定限度, 对渗流量要求不高, 而建造垂直防渗设施又有困难的工程, 特别是对中小型工程, 是一种可靠的防渗措施。透水坝基表面完整的天然粘性土层和多泥沙河流上的水库淤积物, 可以用作天然铺盖。在铺盖及其地基之间要设反滤层。

垂直防渗设施 常用的有开挖回填截水槽、混凝土防渗墙和灌浆帷幕三种。它们能有效并可靠地截断坝基渗流, 对大型和重要工程应优先采用。

(1) 开挖回填截水槽。其优点是需机械设备较



少,工程质量有保证。以前常用于深度在 20 m 以内的透水地层,现代利用大型施工机械,挖填能力增强,对深厚覆盖层有时也选用此方案。回填材料有粘土、混凝土等。泥浆截水槽是用机械在泥浆下开挖沟槽,而后用开挖出来的材料与泥浆混合后回填,用于低水头的水工建筑物,也可归纳到截水槽一类内。

(2)混凝土防渗墙。用机械在泥浆固壁作用下建造圆孔或槽孔,在其中浇筑混凝土,形成圆柱或槽板,并相互搭接成墙。常用的造孔机械有冲击钻、冲击反循环钻、液压抓斗等。回填材料除混凝土外,也有采用粘土、自凝灰浆、固化灰浆等材料。高水头的垂直防渗工程应采用回填混凝土的防渗墙。近年又发展了高压定向喷射法建造水泥土垂直防渗板墙的技术,但多用于临时性和低水头的工程。

(3)灌浆帷幕。通过钻孔向砂砾石层中灌注水泥浆或水泥粘土浆或水玻璃等胶凝材料,固化后形成防渗帷幕,适用于可灌的深厚砂砾石层。在各种方法中,以套阀花管法最为有效和可靠,中国于 1960 年在密云水库白河主坝坝基处理中曾实际应用,已正常运行三十余年。(见砂砾石层灌浆)

下游反滤排水设施 可使渗透水顺利排走而不带走土骨架颗粒,并可降低坝体浸润线,减小渗透水压力,保证建筑物及其地基的稳定。排水设施与其周围料物的颗粒级配要严格满足反滤要求。在下游土体有可能发生流土破坏时,可加设透水盖重层,以提高其抗流土比降。

软粘土坝基加固处理 软粘土含水量大、密度低、压缩性高、抗剪强度小,虽经加固处理,其承载力也提高有限,不宜用作大坝及其它重型建筑物的天然地基。用作低坝及一般水工建筑物地基时,可采用换土、设置砂垫层、排水预压加速固结、砂桩置换、深层搅拌、高压喷射注浆等方法处理。(见土的加固)

易液化坝基处理 见土体液化。

湿陷性黄土坝基处理 黄土粒间主要由无机盐类和粘土胶结,在干旱条件下具有足够结构强度,能维持其低密度、高孔隙结构,而在浸水时结构强度削弱或消失,使结构崩溃而导致大量突发沉降,是为湿陷性。建筑物常因浸水湿陷引起的大量和不均匀的变形而受到破坏。处理的原则是消除其湿陷性。处理方法有:①表面或深层预先浸水,在建筑物修建前或修建过程中完成大部分湿陷。②加密,用重锤夯实、强夯、挤密桩等方法,消除其高孔隙结构,从而避免浸水湿陷。③用物理化学方法使黄土的结构强度转化为水稳定性的,将高孔隙结构固化下来,不再因浸水软化而崩溃,如硅化法、碱液化、热处理法等。

(蒋国澄)

ruanji kancha

软基勘察 (soil foundation exploration)

为论证各类土层作为天然地基的地质调查工作。软基包括:砂砾石、砂性土、粘性土、淤泥及黄土类土等地基。这些土层作为水工建筑物地基,主要问题有:承载力及抗剪强度低、渗透稳定性差、透水性强、遇水湿陷及振动液化等。软基勘察一般包括勘察任务、勘察内容、勘察方法和软基工程地质评价。

软基勘察任务 查明各类土层的埋藏条件、地质结构、研究各土层的物理力学性质,结合建筑物布置及型式,评价地基渗漏、渗透变形、沉陷及地震条件下液化等的可能性及严重程度。

软基勘察内容 调查工作区地形、地貌,各类土层的分布及所处地貌单元,土层的成因、厚度、密度、地质结构、连续性、接触关系。研究砂砾石层的颗粒组成、抗剪强度、弹性特征、水文地质结构及渗透性;砂性土的天然结构、颗粒组成、密实性、抗剪强度、抗渗透变形能力;粘性土、淤泥及黄土等的颗粒成分、含水量、崩解、湿陷性、渗透性、压缩性及抗剪强度等。

软基勘察方法 首先进行地质测绘,其精度根据勘察阶段及具体地形地质条件确定。在此基础上进行勘探和试验。物探可在较大范围快速了解土石层厚度,划分有一定厚度的层次,测试动参数及地下水位。坑槽探直观准确,适用于地下水位以上不厚的土层,既便于观察又可取样和进行现场测试。钻探适用条件广,用以探查砂砾石层时,除能确定厚度及水文地质结构外,还可求得渗透系数。粘性土及砂性土在钻探的同时,可进行标准贯入试验。软基除分层取样进行室内试验测定基本物理力学性质外,现场试验是勘察的重要环节,常用的方法有①载荷试验。在试坑中一定尺寸的平板上逐级加荷,测各级载荷的沉降,据此确定地基承载力和变形模量。②静力触探。将符合规格的锥形探头,按一定速率压入土中,量测土对探头的阻力,以判断土的性质。③动力触探。利用一定能量的落锤,将符合规格的探头打入土中,据其难易程度,判断土的性质。④剪切试验。对试坑中的试件,在不同垂直荷重下进行剪切,根据剪切强度与垂直应力的关系,确定土的摩擦角和凝聚力。⑤土体应力测试,采用专门的压力计,测试土体在受力状态下的土压力和孔隙水压力及变化。⑥土体动力测试。以物探仪器测弹性波在上中的传播特性,换算土的剪切模量和动弹性模量。

软基工程地质评价 ①砂砾石地基渗透变形,即管涌、流土、接触流失及接触冲刷,通常根据其颗粒级配、不均匀系数、细粒含量及渗透系数等,分析地基土渗透破坏形式。②非粘性土的地震液化可能性根据土层的天然结构、颗粒组成、密实性、埋藏条件和标准贯

入击数等综合分析对比确定。③黄土类土的湿陷性可依地质年代、土的性质、层位、含水量及成因等方法判定。④软土如淤泥类土及软粘土等，抗压强度低、灵敏度高、压缩性强，在饱和振动条件下抗剪强度会降低，

一般以塑性指数、无侧限抗压强度、标准贯入击数等指标加以判别。

(崔诗礼)



Sayang - Shushensike Shuidianzhan

萨扬-舒申斯克水电站 (Sayano - Shushensk Hydropower Station) 位于苏联西伯利亚叶尼塞河上游的萨扬峡谷出口,舒申斯克村附近。电站总装机容量 6400 MW, 保证出力 2100 MW, 多年平均年发电量 235 亿 kW·h, 是苏联建成的最大水电站。电站以 500 kV 超高压输电线与西伯利亚联合电力系统相联接, 主要向萨扬工业综合体供电。电站除发电外, 还有航运效益。大坝为混凝土重力拱坝, 最大坝高 245 m。工程于 1963 年着手施工准备, 1968 年 9 月开工兴建, 第一台机组 1978 年 12 月发电, 全部 10 台机组 1987 年安装完毕, 总工期 19 年。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 18 万 km², 多年平均年径流量 467 亿 m³。正常蓄水位 540 m, 相应库容 313 亿 m³, 回水长度 290 km。死水位 500 m, 调节库容 153 亿 m³, 库容系数 β_1 为 0.33, 可进行季调节。大坝按万年一遇洪水设计, 洪峰流量 15900 m³/s。

枢纽布置 坝址地层由前寒武系坚硬的结晶片岩组成, 抗压强度达 150MPa。电站枢纽包括大坝和厂房等建筑物, 远景规划拟增建升船机, 见图。

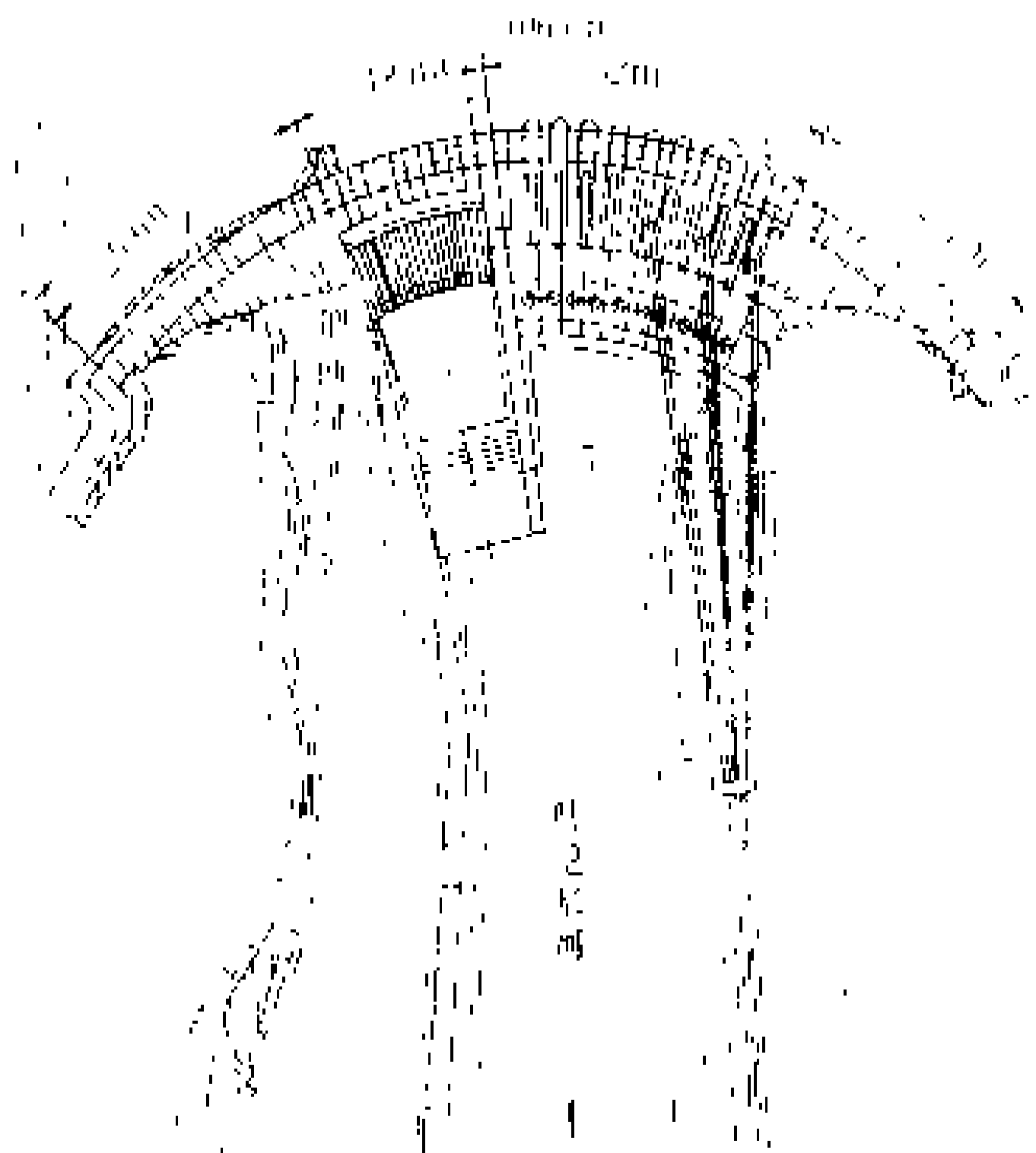
重力拱坝坝顶长 1066 m, 坝顶高程 547 m, 最大坝厚 100 m, 混凝土 875 万 m³。大坝平面呈弧形, 曲率半径 600 m。沿坝顶自右至左分为 4 部分: 右岸非溢流坝段, 长 299 m; 溢流坝段, 长 189 m; 厂房坝段, 长 332 m; 左岸非溢流坝段, 长 247 m。坝基帷幕灌浆深度 100 m。溢流坝设有 11 个溢流孔, 每孔宽 5 m, 设计泄洪量 13600 m³/s, 下游设消力池。

坝后式厂房平面亦呈弧形, 长 288 m, 内装 10 台单机容量为 640 MW 的立轴混流式水轮发电机组。压力钢管内径 7.5 m, 以背管方式布置在坝体下游面。

机电设备 混流式水轮机, 转轮直径 6.77 m, 转速 142.8 r/min, 比转速 158.3 m·kW。额定水头 194 m, 流量 358 m³/s, 额定出力 650 MW, 最大水头 212 m, 最大出力 735 MW; 最小水头 175 m。转轮重 156 t, 采用耐汽蚀不锈钢制造。发电机为伞式, 额定电压

15.75 kV, 额定容量 711 MV·A, 最大容量 736 MV·A, 转子采用强制风冷, 定子采用水内冷。发电机转子重 935 t, 发电机总重 1860 t。采用晶闸管励磁。2 台机组连接 1 组容量为 1599 MV·A 的单相变压器组, 形成扩大单元接线, 升压至 500 kV。

提前发电措施 电站在施工阶段采取了两项提前发电措施, 使 6 台机组在大坝浇筑尚未达到正常发电高程时, 先后提前发电。一项措施是: 在坝体较低的 3 个高程上设置 6 个临时进水口, 供先期投产的 6 台机组引水发电。当永久进水口建成后, 将 6 个临时进水口和其后的水平段用混凝土封堵。另一项措施是, 首批投运的 2 台机组采用直径为 6.05 m 的临时转轮, 在水头 60~140 m 的范围内发电, 出力分别为 155 MW 和 400 MW, 当水库水位超过 460 m 高程后, 再更换正式转轮。由于提前发电的安排, 1978 年至 1987 年, 电站共发电 970 亿 kW·h。



萨扬-舒申斯克水电站枢纽平面布置图

1—右岸非溢流坝; 2—溢流坝; 3 厂房坝段; 4 左岸非溢流坝; 5—水电站厂房

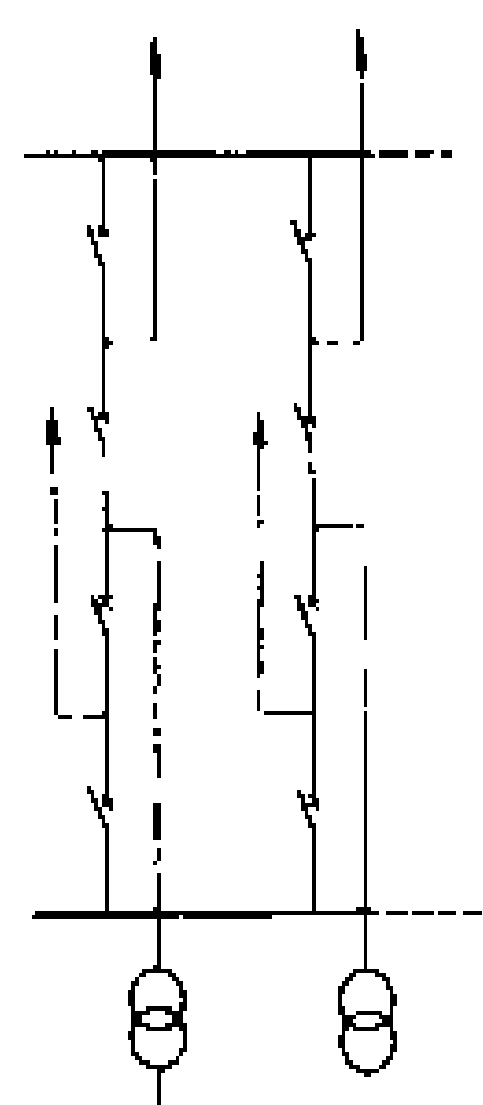
工程量和投资 土方开挖量 1082 万 m³, 石方开挖 616 万 m³, 土石方填方 1172 万 m³, 混凝土总方量 979 万 m³, 金属结构和设备安装 10.1 万 t。施工时配备有年产 120 万 m³ 和 60 万 m³ 的混凝土连续拌和楼各 1 座, 施工高峰期共使用工人 6000 人, 混凝土最高年浇筑量为 120 万 m³。

(高义生)

santenzhisi duanluqi jiejian

三分之四断路器接线 (one and a third breakers connection) 3 条回线有 4 台断路器的双母线电路, 也称 4/3 接线。

此种接线与一个半断路器接线类似,其优点为:①比双母线带旁路母线接线简单清晰。②供电可靠性高。任一条母线所连接的设备故障或检修,以及任一台断路器检修都不影响任何回路的正常供电。③即使两条母线同时故障,也不会造成全电站停电。④操作检修方便,隔离开关仅作检修时用,有利于实现操作自动化和远动化。⑤正常工作时两条母线和所有断路器都投入运行,从而成多环形供电,运行调度灵活。缺点是:①继电保护和二次接线比较复杂,增加二次设备的维修工作量。②任一回路故障,需同时开断两台断路器,断路器需满足并联开断的要求。③对担任调峰任务的水电站,由于经常开停机,需频繁切合两台断路器,增加断路器故障几率和检修工作量。停机使多环形供电成开环运行,影响供电可靠性。



三分之四断路器
接线图

三分之四接线和一个半断路器接线相比,可以节约断路器数量、节约投资,然而布置较复杂。

三分之四接线一般适用于对供电可靠性要求较高、出线电压在 220 kV 及以上、进出线回路数较多的大型水电站。当进线和出线回路数大体成 2:1 或 1:2 的情况下较为适宜。例如加拿大的波太基山 (Portage Mountain) 水电站 (装机 10×227 MW) 的 500 kV 升压站就采用了三分之四断路器接线,两个发电机-变压器组配一回 500 kV 出线,共接于一串上。加拿大的邱吉尔瀑布水电站 (装机 11×475 MW) 的 735 kV 升压站也采用了三分之四断路器接线,两组变压器配一回 735 kV 出线,共接于一串上。苏联的萨扬舒申斯克水电站 (装机 10×640 MW) 500 kV 侧也采用了三分之四断路器接线。中国二滩水电站 500 kV 侧也采用了三分之四断路器和一个半断路器混合接线。

(潘天缘)

Sanmenxia Shuli Shunliu

三门峡水利枢纽 (Sanmenxia Hydroproject) 黄河干流上兴建的第一座大型水利枢纽。位于黄河中段下游,河南省三门峡市和山西省平陆县交界处。具有发电、防洪、防凌、灌溉等综合利用效益。原设计正常蓄水位 360 m,电站装机容量 1160 MW,多年平均年发电量 60 亿 kW·h。大坝为混凝土重力坝,最大坝高 106 m。工程于 1957 年动工兴建,按正常蓄水位 350 m 施工,相应初始总库容 354 亿 m³。

1960 年水库蓄水,1962 年第一台机组试发电。水库蓄水后,由于泥沙淤积,库尾河床抬高,造成上游大量农田淹没并威胁城镇安全。因此,试发电后不久,电站即停止运行。为减缓淤积,保持调节库容,尽可能发挥水库防洪、防凌、灌溉效益,于 1964 年至 1981 年间,先后两次进行改建。第一次改建,增建 2 条泄洪排沙洞,改建 5 号至 8 号 4 台机组段为泄洪管。第二次改建,打开 1 号至 8 号 8 条施工导流底孔,将其改造为泄流排沙底孔,并将 1 号至 5 号机组的进水口高程降低 13 m,相应改建引水钢管,以实现“蓄清排浑,调水调沙”的运用原则。改建后,电站装机容量降为 250 MW,年发电量为 10.2 亿 kW·h,运用最高水位为 340 m。经多年运行后,泄流排沙底孔因长期运用,泥沙磨蚀严重,于 1985 年又对 1 号至 8 号底孔进行了二期改建,并打开和改建 9 号、10 号施工导流底孔,以扩大枢纽泄流能力。现为进一步提高发电效益,又恢复原 6 号和 7 号机组段,正重新安装 2 台单机容量为 75 MW 的混流式水轮发电机组,使水电站装机容量达到 400 MW,多年平均年发电量达到 13.17 亿 kW·h。

水文水库特性 坝址以上流域面积 68.84 万 km²,多年平均年径流量 424 亿 m³,多年平均流量 1344 m³/s。工程设计洪水标准为:千年一遇设计,万年一遇校核。改建后设计洪水流量 40000 m³/s,相应库水位 329 m;校核洪水流量 52500 m³/s,相应库水位 332.6 m。改建后,水电站最大水头 52 m,最小水头 15 m,设计水头 30 m。

枢纽布置 拦河坝座落在坚硬的花岗岩和闪长玢岩上,混凝土重力坝坝顶长 713 m。改建后,枢纽由左岸 1 号和 2 号泄洪排沙洞、左岸非溢流坝段、溢流坝段、厂房坝段、右岸非溢流坝段、发电厂房以及 220 kV 和 110 kV 屋外开关站等建筑物所组成,见图。

改建后,厂房 1~5 号机组段安装 5 台 25 MW 竖轴转桨式水轮发电机组,额定转速 100 r/min。水轮机转轮直径 6 m。发电机为悬式空冷型,额定电压 10.5 kV,额定容量为 62.5 MV·A,额定功率因数 0.8。6、7 两个机组段扩建安装单机容量为 75 MW 的混流式水轮发电机组,水轮机额定水头 36 m,最大水头 47.7 m,最小水头 27.4 m,转轮直径 5.5 m,额定转速 88.2 r/min。发电机为悬式空冷型,额定电压 13.8 kV,额定容量 88.235 MV·A,额定功率因数 0.85。110 kV 开关站位于厂房右侧,双母线间用混凝土结构分为两层,每层均为典型中型布置,运行维护十分方便。220 kV 开关站布置在厂房下游右岸。

泄洪设施 左岸设有泄洪排沙洞 2 条,明流段断面为城门洞形,宽 9 m,高 12 m。水位 330 m 时,最大泄流量为 2658 m³/s。大坝设有深水泄水孔 12 孔和



泄流排沙底孔 10 孔，断面尺寸均为 $3\text{ m} \times 8\text{ m}$ 。水位 330 m 时，最大泄流量共 $9746\text{ m}^3/\text{s}$ 。

运行情况 三门峡水电站是目前中国河南省电力系统中仅有的一座大型水电站，对改善电力系统运行具有一定作用。除电站发电外，水库发挥了防洪、防凌效益。1977 年黄河大水，三门峡入库洪水 $15400\text{ m}^3/\text{s}$ ，经水库拦蓄后，出库流量仅 $8900\text{ m}^3/\text{s}$ ，削减洪峰 42% 。凌汛期，水库可控制下泄流量到 $500 \sim 200\text{ m}^3/\text{s}$ ，最小可到 $150\text{ m}^3/\text{s}$ ，可减轻下游冰凌灾害。三门峡改建后库容减小，汛期水中含有大量泥沙，水轮机

设计和施工单位 工程设计原委托苏联列宁格勒水电设计院进行，改建设计单位为天津勘测设计院。施工单位为水利电力部第十一工程局。

(李维藩)

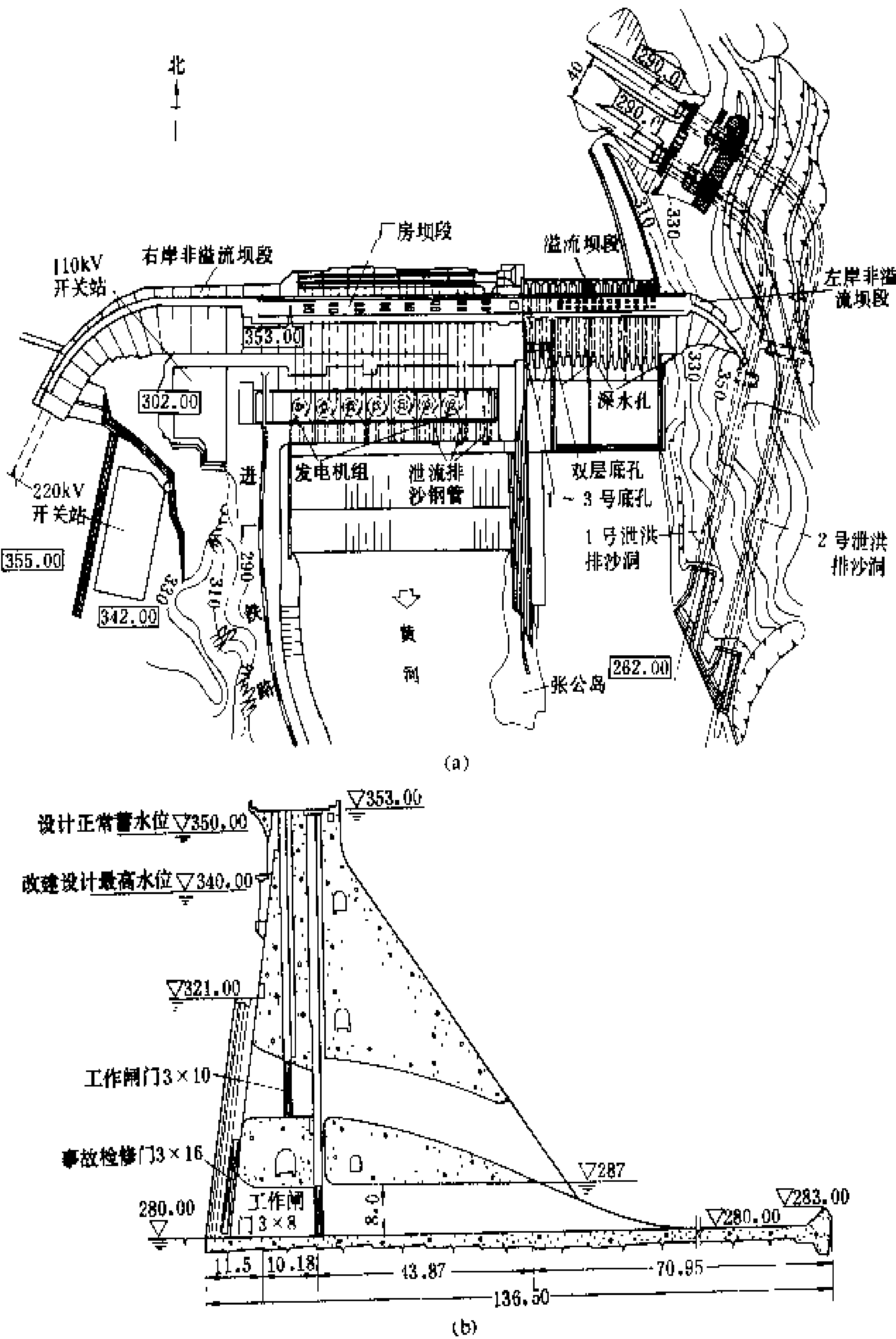
Sanxia Shuli Shunlu

三峡水利枢纽 (Three-Gorge Hydroproject) 坝址位于长江三峡的西陵峡三斗坪镇，下距三峡出口南津关 38 km ，距葛洲坝水利枢纽约 40 km ，具有巨大的防洪、发电、航运等综合利用效益，是

治理和开发长江的骨干工程。工程可使荆江河段避免发生毁灭性洪水灾害，防洪标准达到百年一遇。水电站装机容量 18200 MW ，保证出力 4990 MW ，多年平均年发电量 $846.8\text{ 亿 kW} \cdot \text{h}$ 。规划中以交流 500 kV 向华中和川东供电，以交流 500 kV 、直流 $\pm 500\text{ kV}$ 或 $\pm 600\text{ kV}$ 混合输电方式向华东送电。设有双线五级连续船闸，万吨级船队可直达重庆。大坝为混凝土重力坝，坝顶高程 185 m ，最大坝高 175 m 。

20 世纪 20 年代，孙中山在其《建国方略》中就提出了三峡建坝的设想。40 年代资源委员会曾与美国内政部垦务局 (United States Bureau of Reclamation, USBR) 合作提出了《扬子江三峡计划初步报告》。1949 年中华人民共和国建立后，为治理长江，开展了大规模科研、规划和勘测设计工作。长江流域规划办公室于 1959 年完成

了《长江流域综合利用规划要点报告》，报告中推荐三峡工程为长江流域规划的关键性骨干工程。此后，

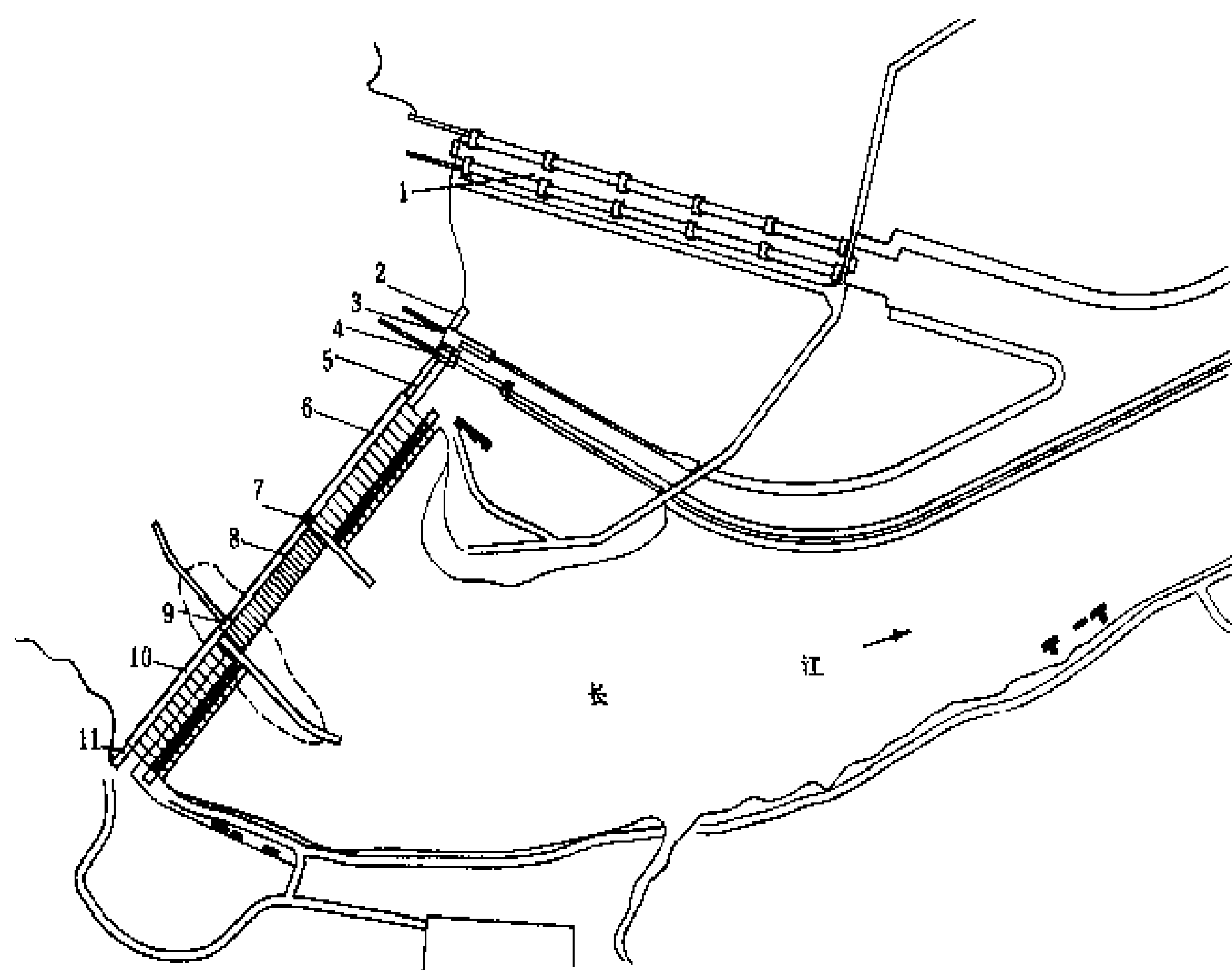


三门峡水电站枢纽平面布置图

过流部件磨损严重，机组停修时间长，损失大量电能。

三峡工程的科研和勘测设计工作一直延续至今。1986~1989年全国412位专家对14个专题进行论证。论证提出“一级开发，一次建成，分期蓄水，连续移民”的建设方案。坝顶高程185 m，初期运行水位156 m，最终正常蓄水位175 m。水利部长江水利委员会根据论证成果编制了《长江三峡水利枢纽可行性研究报告》，国务院对可行性报告组织了审查。1992年4月，全国人民代表大会七届五次会议审议通过了《关于兴建长江三峡工程的决议》，三峡工程列入国家1990~2000年国民经济和社会发展十年发展规划。1993年7月27日国务院审查批准了《长江三峡水利枢纽初步设计报告(枢纽工程)》，三峡工程正式进入施工准备阶段。

洪道两端的导墙内，各设有2个深孔和2个中孔。在水



三峡水利枢纽平面布置示意图

1—双线五级连续船闸；2—升船机左侧非溢流坝段；3—升船机；4—临时船闸；5—左岸非溢流坝段；6—左厂房坝段及左岸厂房；7—导墙坝段；8—泄洪坝段；9—纵向围堰坝段；10—右厂房坝段及右岸厂房；11—右岸非溢流坝段

位175 m时，枢纽最大泄洪能力为 $93530 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

(3) 电站厂房。坝后式厂房，进水口底坎高程110 m，引水钢管直径12.3 m。左岸厂房长634 m，安装14台混流式水轮发电机组，水轮机转轮直径9.58 m，单机容量700 MW。右岸厂房长575.8 m，安装12台相同水轮发电机组。

(4) 通航建筑物。布置在左岸，包括双线五级连续梯级船闸和垂直升船机。船闸闸室有效尺寸为280 m(长)×34 m(宽)×5 m(水深)，可通过万吨级船队。升船机为垂直提升式，承船箱有效尺寸为120 m×18 m×4 m。通航设施的远景单向下水总过坝能力为5000万t/年。

施工期另设一线临时船闸，闸室有效尺寸为240 m(长)×24 m(宽)×4 m(水深)，结合导流明渠和升船机，满足施工期通航要求。

综合利用效益 主要有防洪、发电和航运三个方面。

(1) 防洪效益。三峡工程控制荆江河段洪水来量的95%，控制武汉以上洪水来量的2/3左右。三峡水库有防洪库容221.5亿 m^3 ，调节运用，可使荆江河段的防洪标准，从十年一遇提高到百年一遇；遇千年一遇洪水或历史上发生过的特大洪水(如1870年洪水)时，配合分蓄洪区工程运用可将上荆江洪峰流量，由110000

水文和水库特性 坝址以上流域面积100万 km^2 ，多年平均年径流量4510亿 m^3 ，多年平均年输沙量5.3亿t。正常蓄水位175 m，相应库容393亿 m^3 。防洪限制水位145 m，相应库容171.5亿 m^3 ，防洪库容221.5亿 m^3 。枯季消落低水位155 m，相应库容228亿 m^3 ，调节库容165亿 m^3 。主要建筑物按千年一遇洪水设计，万年一遇洪水加10%校核，相应洪峰流量分别为98800 m^3/s 和124300 m^3/s ；相应库水位分别为175 m和180.4 m。总库容为450.4亿 m^3 。

水电站设计水头80.6 m，最大水头113 m，最小水头71 m。

枢纽布置及主要建筑物 工程枢纽自左至右顺序为双线五级连续船闸、升船机左侧非溢流坝段、升船机、临时船闸、左岸非溢流坝段、左厂房坝段及左岸厂房、导墙坝段、泄洪坝段、纵向围堰坝段、右厂房坝段及右岸厂房、右岸非溢流坝段，见图。

(1) 主坝。混凝土重力坝，全长2335 m，坝顶高程185 m，最大坝高175 m。坝基为坚硬完整的闪云斜长花岗岩。

(2) 泄洪设施。设有23孔7 m×9 m的泄洪深孔，孔底高程90 m。设有22孔净宽8 m的表孔，堰顶高程158 m。二者相间布置。溢洪道均用挑流方式消能。溢



m^3/s 削减到 $71000 \sim 77000 \text{ m}^3/\text{s}$, 防止荆江河段发生大量人口伤亡的毁灭性灾害, 并为洞庭湖区的治理创造条件。

(2) 发电效益。三峡水电站装机 18200 MW , 年平均发电量 $846.8 \text{ 亿 kW} \cdot \text{h}$, 每年可替代原煤约 $3000 \sim 4000 \text{ 万 t}$ 。主要向华中和华东地区供电。由于两地电网结构的差异, 可取得 $3000 \sim 4000 \text{ MW}$ 的联网错峰效益, 相当于节约了一座大火电厂和一个年产 1000 万 t 原煤的煤矿。

(3) 航运效益。三峡水库的回水将显著改善宜昌至重庆 660 km 川江航道, 万吨级船队可由武汉直达重庆九龙坡港。年单向下水通过能力可由现在约 1000 万 t 增至 5000 万 t 。经水库调节, 宜昌以下航道的最枯流量可从目前的 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 提高到 $5000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上, 荆江段枯水航运条件将得到改善。

工程地质条件 三峡工程库、坝区地壳稳定, 历史地震活动轻微, 坝址地震基本烈度为 6 度, 建筑物按 7 度设防。坝基为花岗岩, 基岩完整。水库建成后, 可能产生水库诱发地震, 估计最高震级为 5.5 级, 即使在距坝址最近的九湾溪断层发生 6 级地震, 坝址区最大地震烈度也不会超过 6 度。

水库库岸总体稳定条件良好。 1300 km 的干流库岸中, 稳定条件差的有 6 段, 占总长的 1.2% 。 100 万 m^3 以上的大中型崩坍、滑坡体共 140 处, 其中 22 处在建坝后可能失稳, 但即使全部崩滑入库, 也不会塞江断流影响航运。滑坡体距坝址最近的也超过 26 km , 滑动时在坝址处形成的涌浪不高, 对枢纽建筑物无危害。

工程泥沙问题 经过大量现场调查、数学模型计算、物理模型试验以及和已建工程分析对比, 对三峡工程的泥沙问题认识已比较深入。水库采用“蓄清排浑”的运用方式, 汛期维持低水位, 通过坝体深孔排沙。据计算, 水库运用约 100 年后, 泥沙趋于冲淤平衡, 此时仍保留有 85% 的防洪库容和 90% 的调节库容。泥沙在库尾淤积, 洪水位抬高, 不会影响重庆市主要市区; 对库尾航道、港区的不良影响, 可采取综合措施解决。

生态和环境影响 修建三峡工程对生态和环境的影响主要有: 大气环境、局地气候、水温水质、陆生动植物资源、水生生物、环境地质、人群健康、自然景观和文物古迹、下游河道冲刷、对河口和邻近海域影响、库区移民环境容量等方面。其中有有利的, 有不利的, 也有目前难以预测或难于定量的。库区移民环境容量问题则是直接影响工程建设的问题。

(1) 有利影响。主要有: ①代替火电, 少烧煤, 每年减少向大气排放约 1 亿 t CO_2 , 1 万 t CO , 100 万 t SO_2 , 37 万 t NO_x ; ②减轻长江洪水灾害对中游人口稠密、经济发达的平原湖区生态与环境的严重破坏; ③有

利于改善中下游枯水期水质和血吸虫病的防治; ④减少洞庭湖区的淤积; ⑤可以改善库区的局地气候。

(2) 不利影响。主要有: ①部分文物和自然景观被淹没, 应采取迁移保护措施; ②白鳍豚等珍稀动物栖息地环境发生变化; ③库区水流流速减缓, 江水复氧能力和对入江污染物稀释能力减弱等。

(3) 潜在的或目前难以预测和难于定量的。主要有: ①对区域自然生态—社会经济系统的长远影响; ②对河口和邻近海域生态与环境的影响。

(4) 水库淹没和移民。水库淹没陆地总面积 638 km^2 , 涉及川、鄂 20 个县、市。据 1991~1992 年调查, 淹没区人口 84.5 万人 , 考虑各类影响和增长因素, 规划动迁人口约 110 余万人, 耕地 28.82 万亩 , 柑桔地 10.04 万亩 , 各类工矿企业 1602 个 (其中, 大型 6 个)、房屋 3468 万 m^2 。决定采用开发性移民方针, 结合库区经济发展, 把移民安置、库区建设、资源开发、环境保护等方面, 有机地结合起来, 达到移民安置长治久安的目的。

施工安排 主体建筑物工程量初步估算为: 土石方开挖 9871 万 m^3 , 土石方填筑 2864 万 m^3 , 混凝土浇筑 2643 万 m^3 , 钢材 26.6 万 t , 钢筋 32.7 万 t , 帷幕灌浆 35.51 万 m , 排水孔 77.31 万 m , 固结灌浆 36.2 万 m , 混凝土防渗墙 23.1 万 m^2 。

工程施工采用分期导流方式, 分三期施工。第一期围右岸后河, 开挖导流明渠, 修混凝土纵向围堰、左岸临时船闸和升船机, 利用主河槽通航。第二期截断大江, 修筑左岸大坝、左岸厂房和双线连续梯级船闸。第三期截断明渠, 抢修三期碾压混凝土围堰; 修建右岸大坝和右岸厂房; 利用围堰挡水至 135 m , 永久船闸和左岸厂房投入初期运用。

施工总工期初步安排为 17 年: 准备期和一期工期共 5 年, 二期工期 6 年, 三期工期 6 年。自施工准备工程开工时起算, 第 11 年, 永久船闸启用, 左岸厂房第一批机组发电; 第 15 年, 右岸大坝开始挡水, 蓄水位抬高到 156 m ; 第 21 年, 水库可蓄水到正常蓄水位 175 m 。

设计和建设单位 水利部长江水利委员会设计, 中国长江三峡工程开发总公司建设。

(王家柱)

sanshi shuilun tadianji

伞式水轮发电机 (umbrella type hydro-generator) 见立式水轮发电机。

santi lixue

散体力学 (mechanics of granular media)

固体力学的一个分支, 是研究散体在受力时的极限



平衡和运动规律的学科。散体是几何尺度属于同一量级的颗粒的集合体,其力学性质用内摩擦角 ρ 和粘聚力 k 描述。土、砂粒、谷物等都是散体,后两者颗粒之间没有粘聚力,称为理想散体。散体力学研究 3 个方面问题:①散体的极限载荷问题。例如,确定地基的承载能力,研究边坡的稳定性等。②散体和相邻物体间的相互作用问题。例如,散体对料仓壁的作用,土对挡土墙的作用等。③散体动力学。例如,碎矿石的运动规律以及贮塔放出物料时的受力状况和物料运动规律的研究。

法国的 C. - A. de 库仑(C. - A. de Coulomb)于 1773 年提出,在外力作用下,散体在法线为 n 的截面上保持平衡的条件是

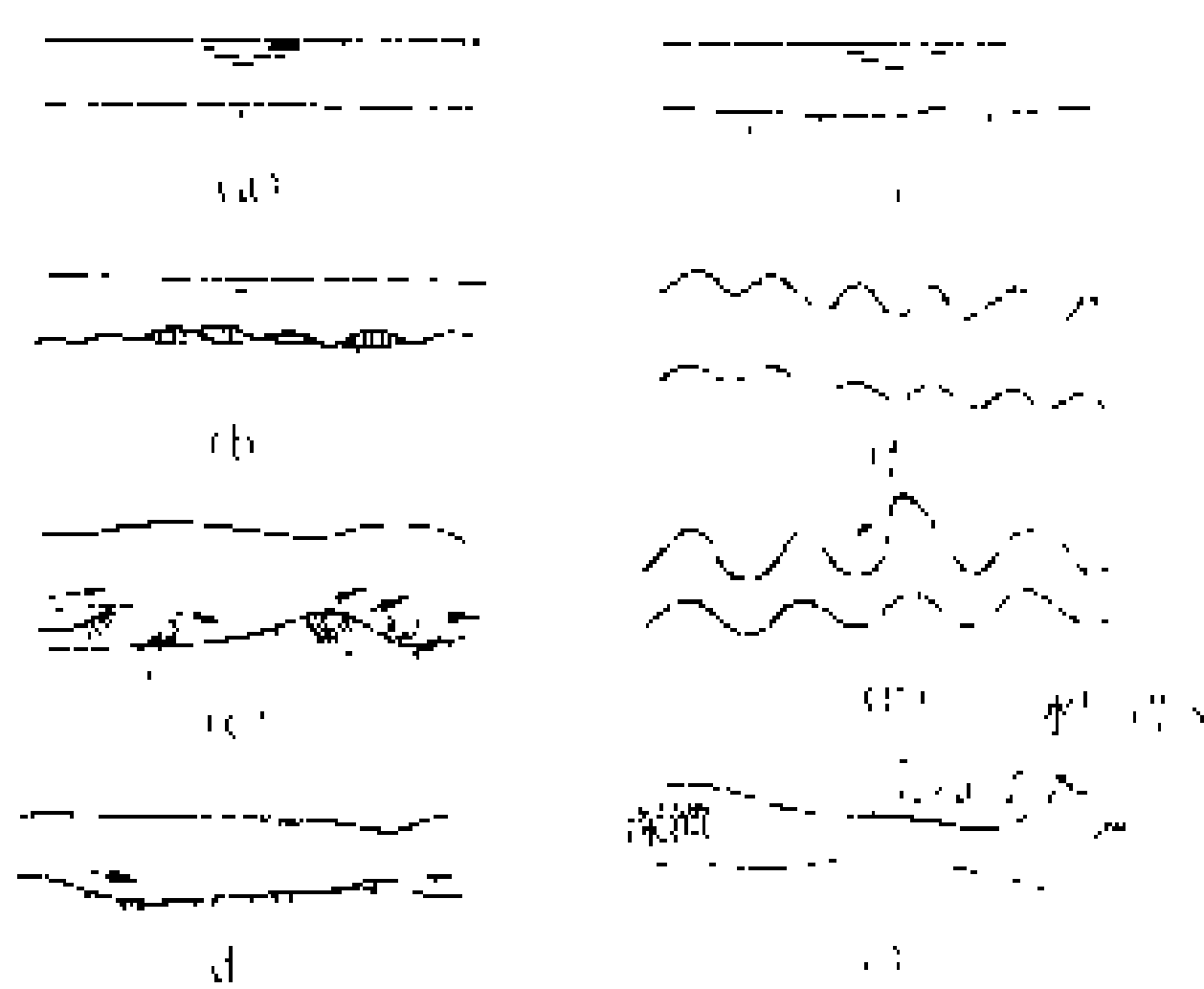
$$\tau_n \leq \sigma_n \tan \rho + k$$

式中 σ_n , τ_n 分别表示截面上的正应力和剪应力。极限平衡时,上式取等号,质点处于不稳定状态。极限平衡面上可能产生滑移,所以该面称为滑移面。工程中常常对滑移面作出不同的假设,然后进行分析。英国的 W. J. M. 朗肯(W. J. M. Rankine)于 1857 年首先从应力分析的角度研究了散体的极限平衡,滑移线理论就是在此基础上发展起来的。20 世纪 30 年代塑性极限分析的上下限定理提出后,极限分析在散体力学问题中得到了广泛的应用。近年来,有人着手用概率方法分析散体力学问题,并取得了一些成果。

(殷有泉)

shabo yundong

沙波运动 (sand wave motion) 推移质泥沙颗粒在河床床面的群体运动形式。室内试验和室外观测均表明,随着水流强度的变化,沙波有其产生、发展和消失的过程。一般随着水流强度的加强,河床有平整、沙纹、沙垄、动床平整、沙浪及急滩与深潭等几个阶段。见图。



沙波不同发展阶段示意图

(1) 沙纹 (ripples)。沙纹具有三角形的纵剖面,长度一般不超过 30~40 cm,高度不超过 3~4 cm。

(2) 沙垄 (dunes)。剖面形状与沙纹类似,但尺寸

较沙纹大。

(3) 过渡 (transition)。随着水流强度的增大,沙垄趋于衰微,波长逐渐加长,波高逐渐减小。

(4) 平整 (flat bed)。床面恢复平整,但有较强的泥沙运动。

(5) 沙浪 (anti-dunes)。随着流速再次加大,接近或处于急流状态时,床面再次产生起伏的沙浪。

(6) 急滩与深潭 (chutes and pools)。流速再增加时,床面的起伏剧烈,急滩与深潭相间,急滩段水流属急流,深潭段水流属缓流,两者间通过水跃过渡。

沙波形成后产生的形态阻力是冲积河流阻力的主要组成部分。随着沙波的发展消长,沙波阻力也相应发生很大变化。根据水流及泥沙条件,可以预报床面出现的沙波形态及其阻力。也可以利用沙波的尺寸和运动速度来推算推移质输沙率。其次,沙波运动与水流阻力和床面形态有密切的关系,正确预报沙波运动的发展阶段、沙波形态及沙波阻力对于防洪、航运、给水等部门都很重要。

参考书目

钱宁,万兆惠.泥沙运动力学.北京:科学出版社,1983

(姜乃森)

Shaxikou Shuidianzhan

沙溪口水电站 (Shaxikou Hydropower

Station) 位于福建省闽江支流西溪上,上游距沙溪和富屯溪的汇合口约 6 km,下游距南平市约 14 km,以发电为主,兼有航运等综合效益。总装机容量 300 MW,保证出力 50 MW,年发电量 9.6 亿 kW·h。以 4 回 220 kV 输电线路接入福建电力系统,以 6 回 110 kV 输电线路向南平地区供电。大坝为混凝土实体重力坝,最大坝高 40 m。工程于 1983 年 7 月开工,1987 年 12 月第 1 台机组发电,1990 年 12 月全部投产。

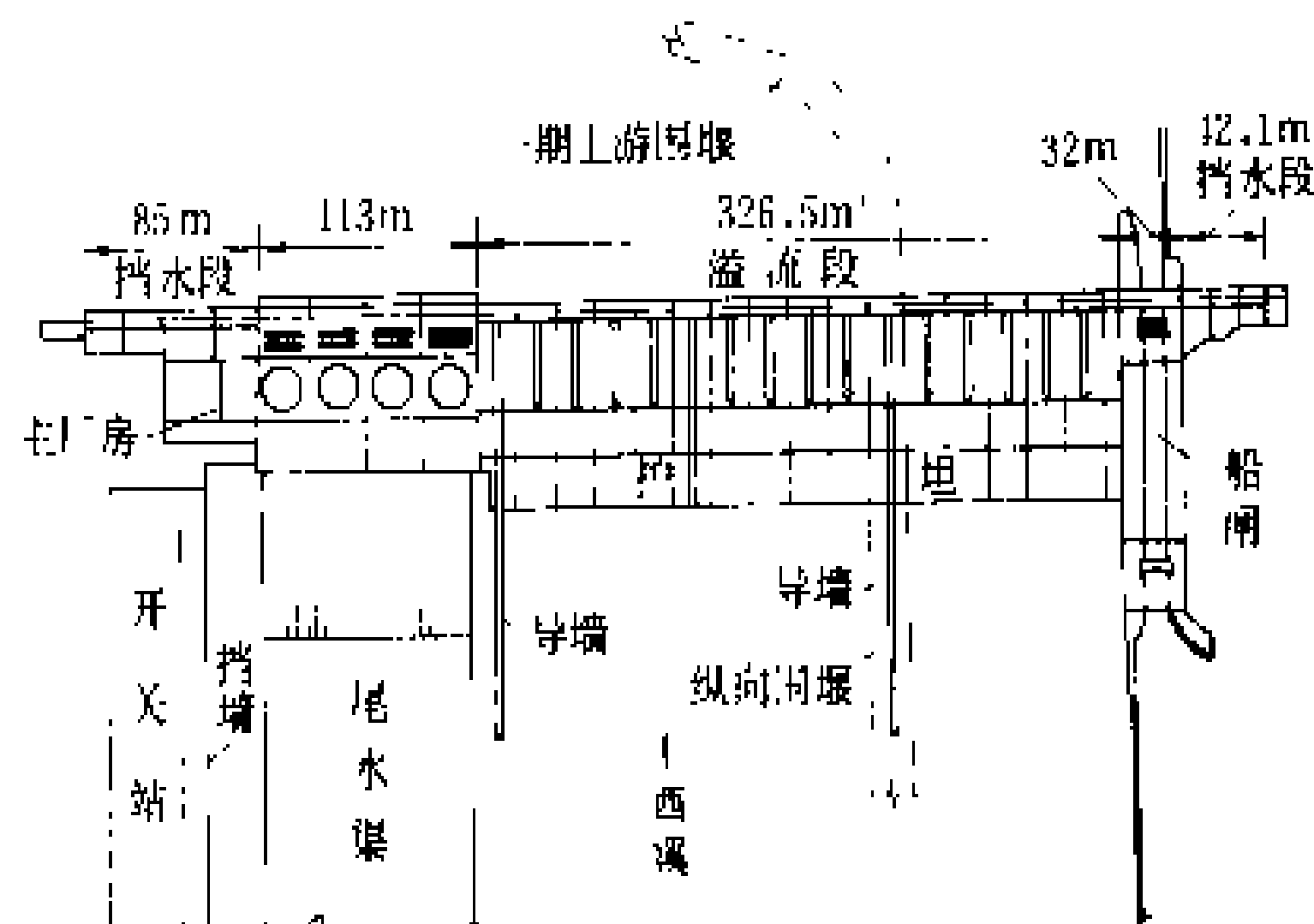
水文和水库特性 坝址以上流域面积 25562 km²,占西溪流域面积的 99%,占闽江流域面积的 42%。多年平均流量 778 m³/s,多年平均年径流量 245 亿 m³。水库按百年一遇洪水设计,千年一遇洪水校核。设计洪水流量 20300 m³/s,相应库水位 85.0 m;正常蓄水位 88.0 m,相应库容 1.64 亿 m³;死水位 82.0 m,调节库容 0.8 亿 m³。属日调节水库。电站设计水头 17.5 m,最大水头 24 m,最小水头 7 m。

枢纽布置 枢纽建筑物由拦河坝、开敞式溢洪道、河床式厂房、开关站和船闸等组成,见图。

坝址地震基本烈度为 6 度。坝址基岩以石英片岩为主,断裂发育。



拦河坝为混凝土重力坝,坝顶全长 628 m,坝顶高程 93.0 m,最大坝高 40 m。



沙溪口水电站枢纽平面布置示意图

溢流坝段有 16 孔开敞式溢洪道,每孔宽 17 m,溢洪道全长 326.5 m。溢流孔底坎高程 74.3 m,设有 16 扇尺寸为 17 m×14.8 m (宽×高) 的弧形闸门。堰顶单宽流量:设计洪水位时为 $71 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,校核洪水位时为 $93 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。采用岸斗消能方式,岸底高程 60 m,反弧半径 12 m,岸角 35° 。护坦长 40 m,厚 2 m。

河床式厂房位于河床右侧,内设 4 台轴流转桨式水轮发电机组,水轮机转轮直径 8 m,单机容量 75 MW。主厂房长 160 m,宽 67.9 m,高 62.57 m。机组段长 113 m,安装场位于厂房右端。副厂房布置在主厂房下游侧。2 台容量为 180 MVA 的三相变压器布置在尾水平台上。110 kV 和 220 kV 屋外开关站布置在下游尾水渠右侧平台上。

300 t 级船闸,水级为 24.2 m,采用底部长廊道分散输水方式。闸室尺寸为 $130 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ (长×宽×最小水深)。

工程施工 主要工程量为:土石方开挖 78 万 m^3 ,混凝土浇筑 79 万 m^3 ,帷幕灌浆 1.04 万 m,固结灌浆 2.44 万 m,钢筋、钢材 2.92 万 t。施工导流采用分期导流方式。第一期先围右河床,进行厂房和右侧 10 个溢流坝段施工,水流由左侧河床下泄;第二期围左河床,进行其余溢流坝段和船闸施工,3 号和 4 号机组段做为二期围堰截流和导流用,汛期利用右侧 10 孔溢洪道宣泄洪水。二期围堰建成后,利用围堰挡水发电。

设计单位和施工单位 华东勘测设计院设计,闽江水电工程局施工。

(张宝英)

shalishi diji guanjiao

砂砾石地基灌浆 (sand-gravel foundation grouting) 对砂砾石地基进行处理的灌浆。在砂砾石地基中进行灌浆,其主要目的是建造防渗帷幕。

砂砾石地基中进行灌浆,其主要目的是建造防渗帷幕。

般有两种情况,一是用于临时性工程,例如围堰的基础防渗;另一是用于永久性工程,例如大坝基础的防渗帷幕,它必须与大坝自身的防渗体紧密相连。

在砂砾石地基上建坝,坝基防渗采用灌浆帷幕方法的主要优点是:帷幕对地基变形的适应性好,施工中灵活性大,尤其适用于深厚砂砾石层的坝基防渗处理。

在砂砾石层进行灌浆,必须查清地质情况,例如:砂砾石层的组成和分布,其中有无粘土和砂的夹层,夹层厚度如何;砂砾石层的渗透性;砂砾石层的颗粒级配等。

针对某种固粒浆液而言,其对砂砾石层是否可灌,一般常依可灌比值 (M) 而定。通常以下式表示: $M = \frac{D_{15}}{d_{85}}$ 。式中 D_{15} 为受灌砂砾石层的颗粒级配曲线上含量为 15% 处的粒径,mm; d_{85} 为灌注材料的颗粒级配曲线上含量为 85% 处的粒径,mm。通常认为 $M > 10 \sim 15$,即表示可以灌注。

在进行坝基帷幕灌浆设计之前,应先进行现场灌浆试验,以试验所得的成果,作为设计的主要依据。

帷幕的型式有均厚式和阶梯式两种。前者帷幕厚度相同,也就是各排灌浆孔的深度相同,多用于较浅的砂砾石层;后者帷幕厚度不同,上部排数多,下部排数逐渐减少,呈上宽下窄的阶梯状,多用于深厚的砂砾石层。

帷幕的深度,一般要求穿过砂砾石层进入基岩。阶梯式帷幕中一般均有 1~3 排孔进入基岩。

砂砾石层灌浆一般采用水泥粘土浆。水泥与粘土的重量比为 1:1~1:4,干料与水的重量比(浆液浓度)为 1:1~1:3。浆液结石 28 天强度要求达到 $5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

选用粘土的条件一般为:塑性指数 10%~20%;颗粒 ($< 0.005 \text{ mm}$) 含量不少于 40%~50%;颗粒 ($0.005 \sim 0.05 \text{ mm}$) 含量不多于 45~50%;含砂量小于 5%;有机物含量小于 3%。

常用的灌浆方法有四种:①打管灌浆法;②套管灌浆法;③循环钻灌法;④预埋花管法。

钻孔的方法依使用的灌浆方法和砂砾石层组成状况而定,可以采用冲击式钻进,也可采用旋回式钻进。当采用前述③和④两种灌浆方法时,允许使用泥浆。

帷幕灌浆完毕后,钻检查孔,做注水或压水试验,求得渗透系数,检验其是否满足设计要求。

通过工程实践,在砂砾石层中使用水泥粘土浆进行灌注,渗透系数可以降低到 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ cm/s}$,若欲再行降低,一般需加用化学灌浆。

(孙 钊)

sheji hongshui

设计洪水 (design flood) 符合指定设计标准的洪水。设计洪水包括水工建筑物正常运用条件下的设计洪水和非常运用条件下的校核洪水，施工期的设计洪水，以及下游防洪对象的设计洪水。它反映水工建筑物或防洪对象抗御洪水的能力，是水利水电工程的重要设计数据。校核洪水是为提高工程安全和可靠程度所拟定的高于设计标准的洪水，用以对水工建筑物的安全进行校核。当水工建筑物遭遇此种洪水时，安全系数允许作适当降低，部分次要建筑物允许破坏，但主要挡水建筑物（坝）应保证安全。

许多国家按工程的规模、坝型、投资及失事后造成的损失，结合风险分析，确定永久性水工建筑物的正常运用与非常运用的洪水标准。中国 1978 年制定了 DJS12-78《水利水电工程等级划分及设计标准》，并于 1990 年颁发了该规范的补充规定。其洪水标准如表 1 及表 2。

表 1 永久性挡水和泄水建筑物正常运用洪水标准

建筑物级别	1	2	3	4	5
洪水重现期 (a)	500	100	50	30	20

表 2 永久性挡水和泄水建筑物非常运用洪水标准

不同坝型的 枢纽工程	建筑物级别				
	1	2	3	4	5
	洪水重现期 (a)				
土坝、堆石坝、 干砌石坝	10000 或可 能最大洪水	2000	1000	500	200
混凝土坝、 浆砌石坝	5000	1000	500	200	100

设计洪水的计算内容包括洪峰流量、不同时段的设计洪量及设计洪水过程线。根据水工建筑物所采用的洪水标准的不同，计算方法有频率分析法和水文气象法两类。

频率分析法 计算各种不同频率的设计洪水，其方法有 3 种。

(1)根据流量资料计算。工程所在地或其附近上下游有较长的实测洪水资料（包括插补延长的资料长达 20 年以上），并有历史洪水调查和考证资料时，可逐年选取最大洪峰流量及不同时段（如最大 24 h、3 d、7 d 等）的最大洪量，分别组成系列，进行频率计算，确定相应于设计标准的设计洪峰流量和洪量。设计洪水过程线一般采用放大典型洪水过程线推求，按求出设计洪峰流量和各时段设计洪量对典型洪水过程线进行同频率或同倍比放大（见设计洪水过程线）。

(2)根据雨量资料计算。工程所在地及其附近的洪

水资料过少，但流域内具有较长期的实测雨量资料时，可先进行设计暴雨计算，再通过产流和汇流计算，推求设计洪峰流量、洪量和洪水过程线。

(3)用地区综合分析资料估算。对于短缺洪水和暴雨资料的中小流域，可根据地区综合资料（如水文手册、暴雨径流查算图表等）查算工程所在地点有关暴雨和洪水的统计参数，估算设计洪水。

水文气象法 计算可能最大洪水。适用于当设计采用土石坝时，失事后对下游将造成特别重大灾害的 1 级永久性挡水和泄水建筑物非常运用洪水标准。计算方法见可能最大洪水。

(顾传智)

sheji hongshui guochengxian

设计洪水过程线 (designed flood hydrograph) 符合设计洪水标准的一次洪水流量过程的图线。是设计洪水的一个组成部分，为水利水电工程进行洪水调节计算，确定泄洪建筑物的规模和尺寸的重要设计依据。设计洪水过程线的计算方法有由流量资料计算和由暴雨资料计算两类。

由流量资料计算设计洪水过程线 此类计算是以实测的典型洪水过程线作为放大的典型。典型洪水过程线的选择要能代表流域上大洪水的一般特性，并选择峰高量大，洪峰发生时期偏后的洪水作为典型。设计洪水过程线的计算方法有两种，即同倍比放大法和同频率放大法。

(1)同倍比放大法。用同一个放大比值放大典型洪水过程线。放大比值按下式计算

$$K_Q = Q_p / Q_t$$
$$K_{W_t} = W_{tp} / W_{tt}$$

式中 K_Q 、 K_{W_t} 为洪峰流量及各时段洪量放大系数； Q_p 、 Q_t 为设计洪峰流量和典型过程线的洪峰流量； W_{tp} 、 W_{tt} 为历时 t 的设计洪量和典型过程线的相应历时 t 的洪量。

对调节能力较小的水库，可取洪峰的倍比 K_Q 放大洪水过程线；当水库较大、泄量较小时，应按洪量倍比 K_{W_t} 放大洪水过程线。

(2)同频率放大法。用设计洪峰和几个不同时段的设计洪量同频率控制放大典型洪水过程线，各时段放大比值按下式计算

$$K_Q = Q_p / Q_t, K_{W_1} = W_{1p} / W_{1t}$$
$$K_{W_2} = (W_{2p} - W_{1p}) / (W_{2t} - W_{1t})$$

式中 Q_p 、 W_{1p} 、 W_{2p} 为同频率的洪峰流量及各时段洪量； Q_t 、 W_{1t} 、 W_{2t} 为典型洪水过程线的洪峰流量和相应各时段洪量。

同倍比放大法计算简便，适用于峰量关系较好的

she 设

河流,特别是对多峰型的洪水过程线或为分析洪水地区组成时使用。同频率放大法,适用于峰量关系不够好的河流,或峰量均对水工建筑物防洪安全起控制作用的工程。控制时段一般只用 2~3 个时段。

由暴雨资料计算设计洪水过程线 通过设计面暴雨、设计雨型时程分配的计算以及产流和汇流计算,可直接求得设计断面处的洪水过程线。

(顾传智)

sheji hongshuwei

设计洪水位 (water level for design flood)

见校核洪水位。

sheji nian jingliu

设计年径流 (design annual runoff) 相

应于设计标准的年径流量及径流系列。年径流设计标准常以保证率或频率表示。设计年径流是水力发电、灌溉、供水、航运等工程规划设计的一项重要水文数据,其计算内容包括:①多年平均年径流量,它反映工程所在河段总的来水条件,是一项重要径流特征值。②符合指定设计保证率的年径流量及径流系列,它反映设计流域径流量的年际变化与年内水量分配的情况,代表未来工程运行期间可能出现的径流来水过程。年径流的设计保证率是根据用水部门的要求确定的,发电保证率常采取 90%~95%,灌溉保证率常采取 75%~80%,城市及工业用水保证率常采取 95%~100%。

设计年径流量的计算 根据工程所在地点的水文资料条件,采用不同的计算方法。常用的方法有以下几种。

(1)频率计算法。当工程所在地点或其附近上下游有较长期的实测径流资料(20 年以上,包括插补延长的资料在内)时采用此法。首先对实测资料作可靠性、系列的一致性及其代表性的检查。如果实测资料的流域受到人类活动影响,径流发生显著变化时,要作还原计算使其恢复到未受人类活动影响的天然状态,以达到系列的一致性。还原计算的主要项目为:工农业生活耗水量、蓄水工程的蓄泄水量、分洪溃口水量、跨流域引入或引出水量等。系列代表性分析是根据还原后的天然径流系列进行,主要是通过分析本流域或邻近相似流域的多年丰、枯周期的变化情况,对比分析径流统计参数等,评定其系列的代表性。若系列代表性不足,应设法延长系列或参照地区综合成果,对统计参数作适当的调整。频率计算的具体方法见水文频率分析。通过计算确定的统计参数(多年平均流量、离差系数和偏差系数),即可求得各不同保证率的年径流量。

(2)等值线图法。适用于中小河流无水文资料地区

的中小型工程。由于水文现象和地理因素之间常存在着一定的内在联系,因而水文参数多呈现地理分布规律。利用这种规律,可对短缺水文资料的地区进行水文计算。当前中国各省、市(区)编制的水文手册,都已绘制出了一套年径流统计参数等值线图,依此查算工程所在地点的统计参数,即可求得不同保证率的年径流量。

不同保证率的年径流年内分配 指径流在一年内随时间变化的过程。当工程所在地点有较长期径流资料时,常采用典型年法,即选取接近于设计保证率年径流量的年份,作为该保证率的典型年。有时同一种保证率有几个典型年份作为该保证率代表年的典型。无实测资料地区,设计年径流量的年内分配,可借用参证站或水文手册提供的年内各月水量分配百分比进行估算,必要时需作适当修正。

(顾传智)

sheying celiang

摄影测量 (photogrammetry) 利用摄影

和传感器获得被研究对象的影像和数字信息,经图像处理、几何信息的量测和物理信息的提取过程,求得物体大小、形状、空间位置和判断其性质等的技术。其特点是不触及被研究物体,而是通过像片或数字信息的研究达到目的,并可在信息中任意选择研究对象。摄影测量可采用多种手段、方法和材料获取固体、液体、气体、静态、动态、瞬间、微小或巨大物体等的影像信息。并促使应用与研究领域不断扩大。摄影测量主要有航天、航空、地面和水下摄影等。因其应用范围、获取信息的方式与传统不同,又称为航天、航空和地面遥感。

发展简史 摄影测量发展至今已有 150 年的历史。从 1839 年法国发表第一张航空像片起,经历了从地面摄影测量发展到航空与航天摄影测量的过程。19 世纪 50 年代,采用地面摄影手段获得成对像片,利用同名射线逐点交会的方法进行测量。20 世纪初(1911 年)奥雷尔(E. Von Orel)设计了地面立体测图仪。30 年代在理论与测图方法上逐步完善,主要还是应用于军事侦察和地形测绘试验。1935 年瑞士制造了第一台机械投影立体测图仪,苏联发展了微分法测图技术,以后出现了空中三角加密技术与模拟测图仪器,使成图速度和精度得到提高,且节省了大量野外作业工作量,推动了摄影测量的前进。60 年代解析测图仪问世,又由人造卫星等航天运载工具获取影像和数字信息,使摄影测量含义与作用发生了新的变化,不再是单一地测绘线划地形图。1988 年第 16 届国际摄影测量与遥感会议提出定义,并指明发展方向,“摄影测量和遥感是一门通过记录、测量和对影像进行判读的过程,来

获得物理对象和环境的可靠信息以及由非接触式传感器系列产生的信息,进行数字表达的工艺、科学和技术”和“数字摄影测量、遥感技术和地理信息系统合成为一个整体”。

地面摄影测量 用地面摄影经纬仪在选定的基线两端,按一定方式摄影,获得被摄物体的立体像对,再在立体测图仪上进行测绘地形图的技术。当不以测绘地形图为目的,而以测绘其它目标物的形态等所进行的地面摄影测量,称为非地形摄影测量,其中近景摄影测量(纵距小于100m)较成熟,也较普遍。当采用多光谱等摄取地面物理信息和几何信息时,又称为地面遥感。

地面摄影测量根据地形测图及其它测量的精度要求,外业需在实地选定摄影控制点及基线端点,并测定其平面坐标和高程。摄影时当摄影机光轴保持水平的情况下,有下列方式获取立体像对:即光轴与基线垂直的摄影,为正直摄影;光轴与基线向左或向右偏同一角度的摄影,为等偏摄影;光轴相交的摄影,为交向摄影。其它还可采用摄影光轴上仰或下倾某一角度的倾角摄影和为摄取动态时瞬间立体像对的同步摄影。内业成图根据光学反转的交会原理在地面立体测图仪、模拟或解析测图仪上进行,求出立体模型上各点的坐标及高程。测绘地形图、立面图或断面图等。

地面摄影存在前后景物遮挡和远近景物在像片上的比例尺不等等缺点,但作业灵活、操作方便,作业条件比较简单、经济,适于水电站建设中陡峻的高山深谷地区的测图,且与工程地质配合,采用多光谱摄影等,可获得更多的地质信息,还可测制地质地形图与地质立面图,减少了测绘人员与地质人员的野外工作量,提高了精度与速度。由于地面摄影测量具有不触及被研究物体的优越性。在水电建设中还可用于大坝合拢时的水舌与流速摄影测量;对水轮机叶片、大坝坝面破损等的摄影测量;在水工模型试验中对冲刷、淤积及流态等的摄影测量,以及对烟雾、水雾、污染等的摄影测量。在其它部门如生物学、古建筑文物,工业农业及环境监测等方面,也已广泛应用。

航空摄影测量 (见航空摄影测量)。

航天摄影测量 以最先进的航天运载工具卫星、宇宙飞船和航天飞机作平台,利用摄影机、多谱段扫描仪和雷达等获取地球及其它星球的图象。所以人们又称之为航天遥感。由于获取了地面从紫外到远红外之间各个谱段的图像信息(胶片记录)和数字信息(磁带记录),地面分辨率从几十米到十米,覆盖地面的周期短。优越性更为突出。如覆盖度宽、面大,应用时便于宏观控制与判断;时相多,波段多,信息量大,便于影像合成,增强与提取信息;覆盖周期短,便于提供地面

动态信息。这一技术已广泛应用于资源调查、气象、环境信息及1:5万比例尺地形图的修测等。遥感可从高空观测地面,并以图象和磁带记录信息,使人们获知在地面上无法感知的大批信息,从而引起人们的极大重视,为人类认识与改造自然创造了新的条件。

其它摄影测量有双介质与水下摄影测量,主要用于测制海底地图,为水下考古和其它科学提供量测手段。摄影方式一类是被摄目标物与摄影机均在水下;一类是被摄目标在水下,摄影机在空中,成像光线穿过两个不同介质,成图时必须考虑各个介质的光学特性、介质分界面的位置与形状等特殊问题,用解析法或解析测图仪进行测量处理。此法技术要求比较复杂,实际应用较少。

参考书目

黄孝悌,实用地面立体摄影测量,北京:水利电力出版社,1988

(茅玉清)

shensuojie

伸缩节 (expansion) 压力钢管道上,具有一定轴向伸缩裕量和良好密封性能的管段。它装设在两镇墩间或蝶阀前,用以适应钢管因受温度影响产生的轴向位移和因建筑物不均匀沉陷等原因发生的横向位移,并便于安装钢管。

在压力管道两镇墩间,为便于管节自下而上地进行安装和减小上镇墩的轴向力,一般伸缩节设置在上镇墩的下游侧。但当两镇墩间管轴线平缓时,也可将其设在管段的中部。

常用的伸缩节型式为套筒式结构(见图),即由套管、插入管和止水填料及调压环组成。其下游管节一般做成较原管内径稍大的渐变型套管,而其上游管节仍保持原管内径作为插入管。套管与插入管的管口间填入石棉盘根,并以调压环压紧盘根,达到止水目的。为使伸缩节在轴向位移时产生的摩阻力最小,插入管端部外壁一般除进行机械加工外应采取镀锌防锈处理,石棉盘根需用动物油脂和石墨粉浸煮后,再填入伸缩节内。

图 1 套筒式伸缩节构造图

套筒式伸缩节构造图
1—套管; 2—插入管; 3—止水填料; 4—调压环



当伸缩节需要适应横向位移时,其结构型式应采用铰接式,即伸缩节由一个套管、二个插入管和二套填料及调压环等组成。套管长度和套管与插入管间的填料间隙是确定伸缩节适应横向位移的重要参数。为适应较大的横向位移,一般将插入管管口的填料面处做成球面外壁。

伸缩节为压力钢管重要设备之一,一般应在工厂制作装配,整体运往现场安装并进行水压试验。

(沈德民)

shenkongshi jinshuikou

深孔式进水口 (submerged intake) 具有一定淹没深度的水电站进水口。

它的孔口上缘高程位于最低水位以下,并有足够的淹没深度,使孔口处不出现负压和漏斗漩涡,避免吸入空气,引起管道的振动和噪声,并防减小流量。设计淹没深度可用经验公式估算,大、中型水电站一般还要通过水工模型试验验证。孔口的下缘位于预计淤沙高程以上,使有害的粗粒泥沙不能进入引水道,以防磨损水轮机、降低其效率。在上述高程范围内进水口的孔口尽量布置在较高处,以减少闸门承受的压力和启闭机的容量,降低设备费用。具有高坝大库的水电站,常要求在蓄水初期低水位发电,可适当降低孔口的高程。

进水口过水通道的进口段沿水流方向逐渐收缩呈喇叭状,常称喇叭口,其轮廓的线型多采用椭圆或圆曲线。喇叭口的上游端安装有拦污栅,一般满足水流过栅流速 1 m/s 左右。喇叭口下游端为闸门室,设有事故闸门。当引水发电中发生事故时,在动水中关闭。在事故闸门的上游设检修闸门或叠梁,在关闭事故闸门后,在静水中关闭检修闸门。检修闸门有时可与拦污栅同槽,检修时提出拦污栅,放下检修闸门。事故闸门与检修闸门均在其下游充水平压后,在静水中开启闸门。

紧靠事故闸门下游引水道的顶部需设通气孔,穿过建筑物或山体直通最高库水位以上。当关闭闸门放空引水道时,用来通入空气防止引水道内出现真空。当引水道要充水时,用来排出引水道内的空气。通气管内允许的气流速度一般为 40~50 m/s。为防万一产生气囊引起高速喷水为害,通气管上口应设在户外,远离人员活动及装有设备的地方。

深孔式进水口的“三防”(防污、防冰、防泥沙)见水电站进水口。

(丁志华)

shenliu

渗流 (seepage) 流体在多孔或裂隙介质中的流动。对水利水电工程,主要研究水在坝体、坝基和

两岸的流动。渗流可造成水量损失;在土坝内形成浸润区;对混凝土闸、坝形成扬压力;还可能造成坝体和坝基的渗透破坏,引起两岸和下游地区的浸没,影响工程安全和正常运行。主要研究内容有:工程地区的水文地质条件(见水文地质学)、渗透性、渗流场分析、渗透变形、渗流控制和渗流监测(见土工原型观测)。

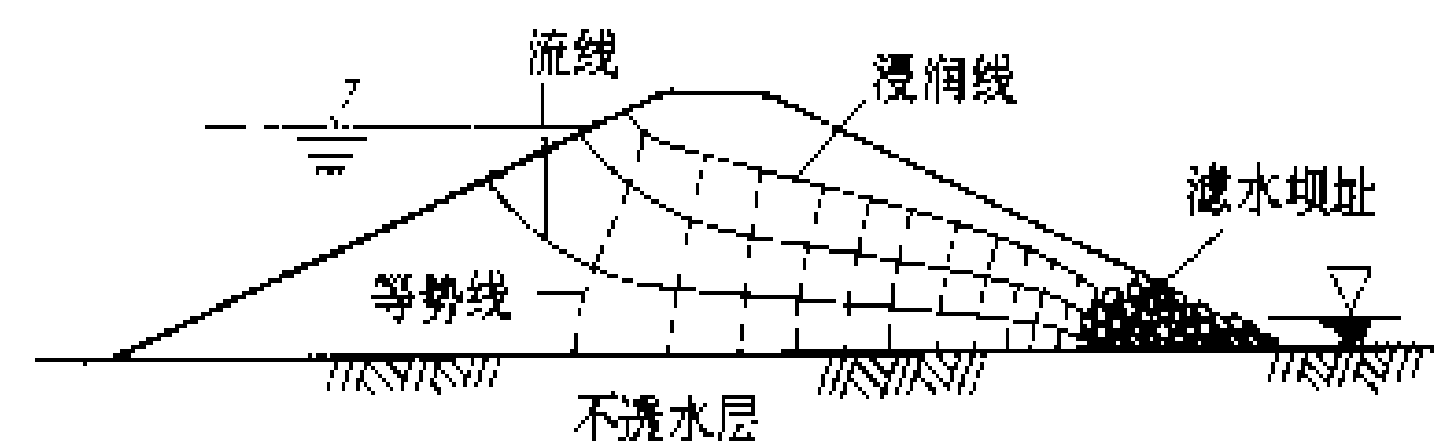
渗透性 水在不同土的孔隙中流动时受到不同阻力,或者说土的透水能力不同,这就是土的渗透特性。1855年 H. -P. -G. 达西(H. -P. -G. Darcy)首先进行了均匀砂的渗透试验,发现渗透速度 v 和水力比降 i 之间的线性关系 $v=ki$,称为达西定律, i 为水头 h 与渗径长度 L 的比值,比例常数 k 即渗透系数。达西定律适用于渗流的层流状态。试验和研究表明,除碎石、卵石等粗粒材料外,绝大多数土料在工程实用范围内可认为满足达西定律。渗透系数 k 的值可通过现场和室内试验测定。裂隙岩体的渗透性较复杂,根据裂隙分布规律和野外试验结果,在渗流场分析时可从宏观上视为各向同性或各向异性介质。

渗流场分析 其目的在于决定渗流场的水力要素,即水头 h ,水力比降 i ,渗透速度 v 和渗流量 Q 。对土体和水体均为不可压缩的情况,满足达西定律的稳定渗流分析可归结为求解拟调和方程 $\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) +$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \text{ (各向异性) 或求解拉普拉斯方程 } \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \text{ (各向同性)。少数情况可用数学分析方法获得以上方程的精确解。当前普遍采用数值分析方法(如有限单元法、有限差分法和边界元法等)和电模拟试验方法求解。随时间改变的不稳定渗流,最常见的是水库水位下降时坝体的渗流自由表面下降情况,可分时段按稳定渗流和变自由表面边界求解,有时也可采用粘滞模型试验。}$$

对于各向同性的两向渗流,获得水头函数 h 后,可以勾画等势线与流线正交的流网图(见图)。并由水头函数 h 进一步决定各点的孔隙水压力、水力比降、渗透力,计算渗流量和闸坝底部的扬压力。

对于各向同性的两向渗流,获得水头函数 h 后,可以勾画等势线与流线正交的流网图(见图)。并由水头函数 h 进一步决定各点的孔隙水压力、水力比降、渗透力,计算渗流量和闸坝底部的扬压力。



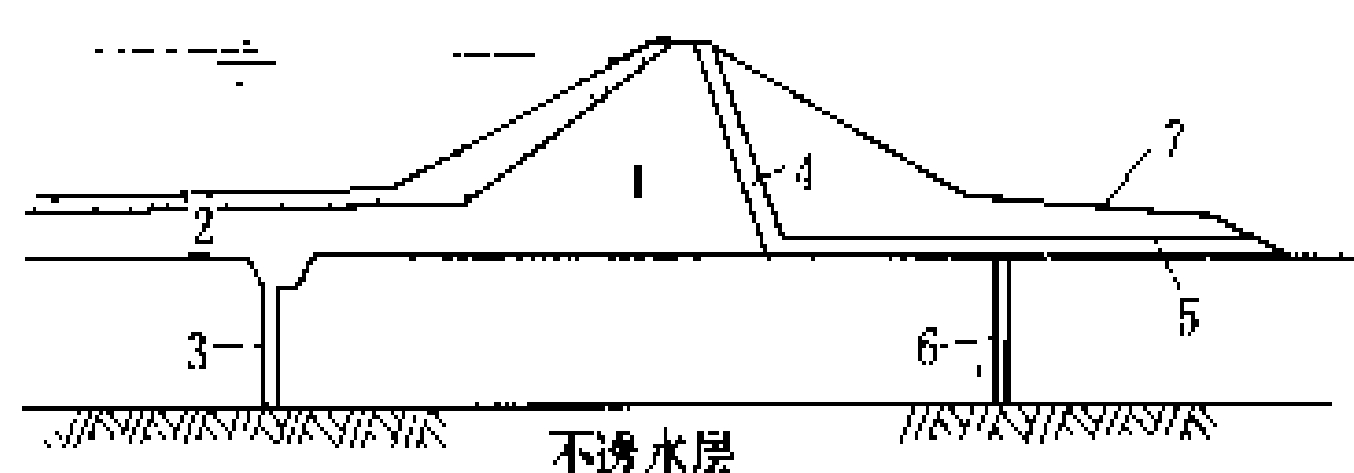
土坝渗流流网图

(刘杰)

shenliu kongzhi

渗流控制 (seepage control) 为了减少渗

漏量,降低土坝浸润线和混凝土闸、坝的扬压力,防止渗透破坏和控制两岸和下游浸没而采取的工程措施。包括坝体、坝基和两岸3个部分的渗流控制。基本方法分防渗和排水两大类。防渗方面有土石坝体的防渗斜墙和心墙、上游铺盖、坝基截水槽、混凝土防渗墙和灌浆帷幕等。排水方面有土质心墙和斜墙后的透水区、均质土坝的垂直排水、褥垫排水及坝基排水沟和减压井等。图为控制土坝渗流的各种措施的示意图。大坝的各类渗流监测设备是检验渗流控制措施效果的重要手段,应视为大坝渗流控制的重要组成部分。



控制土坝渗流的措施布局示意图

1—弱透水区; 2—防渗铺盖; 3—截水墙; 4—垂直排水;
5—褥垫排水; 6—减压井; 7—盖重

防渗 在地基或坝体中利用不透水或弱透水材料截断渗流或延长渗径,减少渗透流量,削减作用水头,以防止坝体和坝基的渗透破坏,并降低土坝坝体浸润线和混凝土结构承受的扬压力。

(1) 土石坝防渗体。有土质防渗体和人工材料防渗体两种,后者包括混凝土面板、沥青混凝土面板或心墙、土工薄膜等,可根据当地材料、气候、施工条件等选用。

(2) 截水槽。在透水地基内挖槽,并用弱透水材料回填。除特别缺水的地区及对渗漏要求较高的情况外,用渗透系数 $k < 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 的土料回填均能满足防渗要求。但需要做好下游反滤层以及与基岩的结合处理,以保持渗透稳定。

(3) 上游铺盖。沿透水地基表面用防渗土料铺设的水平覆盖层,是地基水平防渗的一种措施,其末端与坝的斜墙或心墙相连接,渗透系数应满足 $k \leq 1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 的要求,而且至少小于地基土层的渗透系数的1/100。在坝前的水平长度应在考虑铺盖的有效长度后确定。铺盖与地基的结合面应满足反滤要求。铺盖削减水头有一定限度,故必须与坝下游的反滤排水结合使用。

(4) 混凝土防渗墙。见软基处理。

(5) 灌浆。见灌浆。

排水 一种疏导的方法,将透水性良好的材料有计划地预先置于适当部位,使渗透水流提前释放压力或改变方向,并顺利和无害地排向下游,以保证建筑物的安全。排水设施中反滤层是其主要组成部分,它使排

水设施不仅能排水减压,同时能防止渗透变形,成为渗流控制中极其重要的措施。①均质坝常在坝体中设置一道垂直排水,并与底部的褥垫排水相衔接,截住通过坝体的渗流,使下游部分坝体保持干燥状态,有利于坝体稳定,见图。②土石坝心墙或斜墙下游面的反滤层实际上也起排水作用,能有效地控制通过防渗体的渗流,防止各种类型的渗透变形。③对透水层上部有不透水或弱透水层覆盖的双层地基,常因形成承压水而使下游逸出处地基发生流土破坏,可以用设减压沟、并降低承压水头或加透水盖重解决,见图。④在混凝土坝岩基内设置排水幕(常设置于灌浆帷幕之后)以及在坝与基岩接触面的下游部分设置排水垫层,是降低扬压力的最有效方法。

(刘杰)

shenliu shuidian bini fo

渗流水电比拟法 (electro - hydrodynamic analogy for seepage) 用电场比拟渗流场进行

试验以解决渗流问题的技术,简称电拟试验。多用于复杂的地下水运动、土石坝体及闸坝地基的渗流研究中。其原理是基于电场中的物理量和渗流场中的水力要素间存在的相似关系。水在多孔介质中的运动服从达西(Darcy)定律,其稳定渗流场的拉普拉斯(Laplace)方程为

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

而电流在导电介质中的流动服从欧姆(Ohm)定律,其拉普拉斯方程为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$$

式中 h 为渗流场中的测压管水头, u 为电场中的电位, x, y, z 为空间坐标。可见二者之间的相似性。建立各物理量的相似比尺,满足几何形状和边界条件相似,找出二者的共同解,就可以用导电介质做电场模型来代表所研究的渗流场,将测出的电场要素转换成渗流要素。

根据所研究的对象和研究任务的不同,水电比拟试验可以用平面或空间的模型进行。凡属二维坐标函数的渗流,如闸基、土坝坝体渗流等,都可用平面电拟试验。如模型试验中包括建筑物地下轮廓、复杂地基的分层条件、有明显三向渗流条件等情况,要求同时满足剖面 and 水平面渗流时,就要做空间三维坐标的电拟试验,这种模型有倒置、侧置、分割等多种型式。

电拟试验的模型材料,主要是电解液或一般的纯水,对不同渗透系数的地层可以用不同导电率的电解质溶液,用专门设计的不漏水而电阻极小的专门隔板

shen

分隔的办法进行模拟。还可用电纸、石墨粉等固体导电材料。

电拟试验中用基于欧姆定律和惠斯顿电桥结线原理的检流计进行量测,得到模型中的等电位线图,也就是渗流场中的等水位线图。用流网原理绘制流网图,就可据以计算各渗流要素值。

(李桂芬)

shentou bianxing

渗透变形 (seepage deformation) 由于渗流引起土体或土颗粒移动而导致的土体变形或破坏。土体的渗透变形形式通常归纳为管涌、流土、接触流失和接触冲刷4种。它与地质条件、土的性质、颗粒组成及结构、水力条件和渗流出口的保护条件等因素有关。对单一土层结构,主要是管涌和流土,对双层结构土层或土层与建筑物(或岩体)界面处主要是接触流失和接触冲刷。在实际工程中,首先要判别渗透变形的可能形式,然后确定其抗渗强度,并采取必要的防护措施。

渗透变形形式 ①管涌,指颗粒骨架间的孔隙中细颗粒被渗透水流移动和带出现象。若在某一水力比降(作用水头和渗径长度的比值)下,这种现象连续发展,而且渗透系数增大,则称为发展性管涌;若增大水力比降后带出一些细颗粒,随后又停止,渗透系数也不增大,则称为非发展性管涌。管涌常发生在颗粒组成很不均匀的砂砾石地基中。②流土,指某一局部土体整体隆起、浮动和流失的现象,常发生在较均匀的砂土或粘性土的渗流逸出面上,随后向深部发展。③接触流失,指两种不同粒径的相邻土层接触面处,由于垂直层面的渗流使较细土层中的土粒向相邻较粗土层孔隙中流失的现象。④接触冲刷,指渗流沿两种不同粒径的相邻土层或土层与混凝土建筑物(或岩体)界而带走细颗粒的现象。

判别方法 试验是判别渗透变形形式和确定抗渗强度的有效方法。试验研究表明,粘性土及不均匀系数 $C_u < (5 \sim 10)$ 的无粘性土,渗透变形形式主要是流土; $C_u > 10$ 的无粘性土,渗透变形形式主要取决于细粒含量 p 。 $p > 35\%$ 时为流土; $p < 35\%$ 时为管涌,其中 $p < 25\%$ 时为发展性管涌, $p = (25\% \sim 35\%)$ 时为非发展性管涌,最后破坏形式主要决定于土的密度与结构,可能是流土,也可能转化为发展性管涌。对于双层地基,当细粒土的 $C_u < 10$,且 $D_{10}/d_{10} \leq 10$ 时,一般不会发生接触冲刷;两层间满足反滤要求时不会发生接触流失。 D_{10} 和 d_{10} 分别为粗粒土层和细粒土层的特征粒径,小于该粒径的土粒重为总土重的10%。

抗渗强度 土体抵抗渗透破坏的能力,以临界水

力比降(亦称破坏水力比降) i_i 表示。流土的 i_i 值可按动水压力和土的浮质量平衡的原理,由下式确定

$$i_i = \frac{\rho'}{\rho_w} = (G_s - 1)(1 - n)$$

式中 ρ' 是土体浮密度; ρ_w 是水的密度; G_s 是土粒比重; n 是孔隙率。管涌土的破坏水力比降可用试验方法确定,或用经验公式作初步评价。土体的抗渗强度还与渗流出口的防护条件有关,反滤层可提高土体的管涌破坏比降,反滤层及透水盖重可使被保护土体免于流土破坏。

(刘杰)

shengchuanji

升船机 (ship lift) 将装载于承船厢内或承船车上的船舶,沿倾斜或垂直方向升降而运送过坝的机械设备。升船机与船闸相比,其机电设备较为复杂,但具有不耗水,能适应较大水位差,船舶过坝历时短,在一定条件下工程投资少等优点。水位差越大,上述优点越明显。

升船机按布置形式可分为斜面式和垂直式两大类。按对运载的船舶是否以水承托,分为湿运和干运两种。按其承船厢在运行中是否放入下游水中,又可分为下水式及不下水式。

斜面升船机 一般由上、下游引航道、斜坡线路,承船厢(车),驱动机构,电力拖动及控制系统等部分组成。已建斜面升船机的结构型式有:摇架式、高低轮式、转盘式、岔道式、双层车式、链杆变腿车式和自平式等,其中以高低轮式应用较多,其布置见图1。它利用承船车上设有不同轮距及不同高度的两组行走轮,每一组行走轮分高轮和低轮,在相应同样轨距的轨道

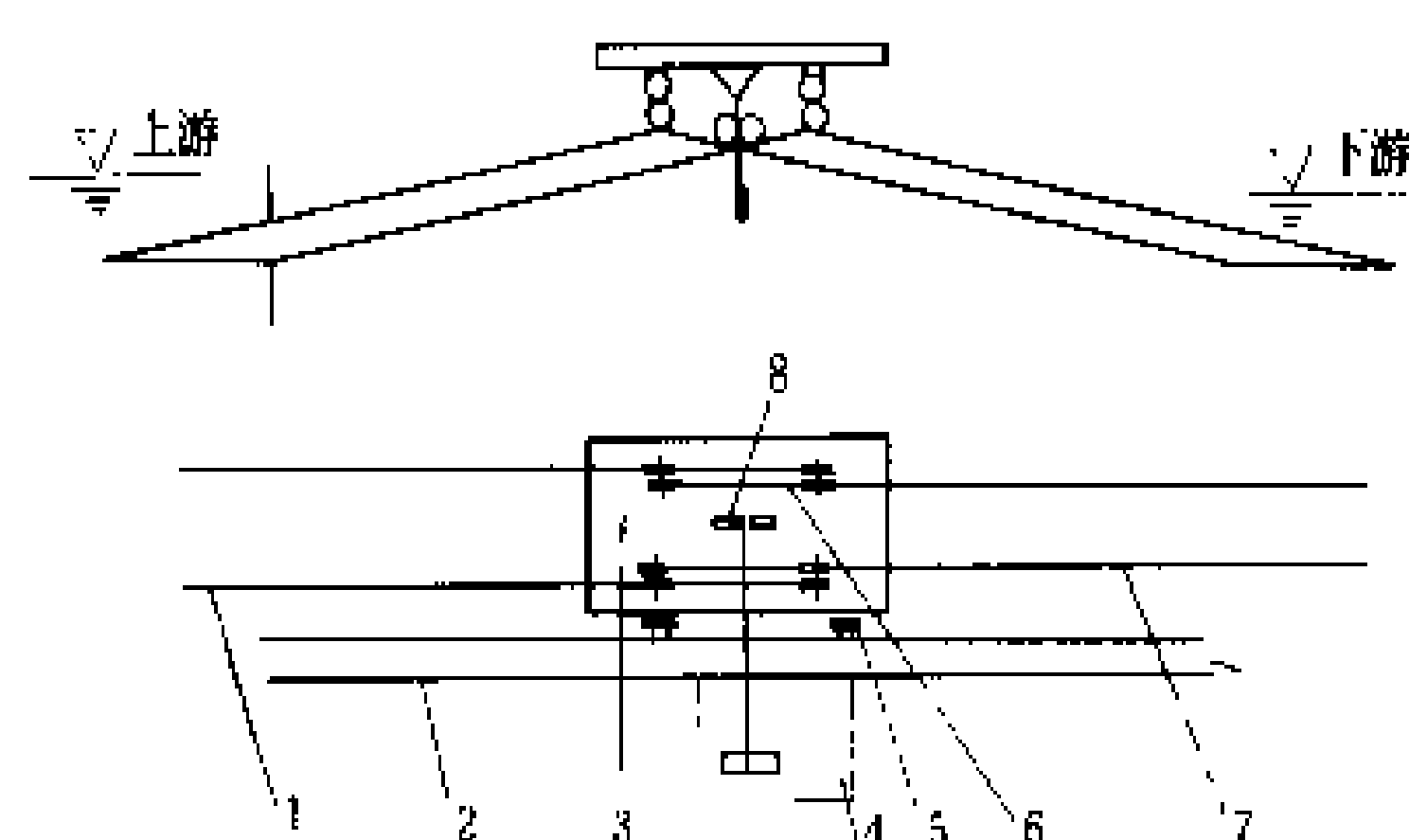


图1 高低轮斜面升船机布置示意图

1—宽轨段;2—工作桥;3—承船车;4—机房和驾驶室;5—行程开关;6—换轨段;7—窄轨段;8—导向滑轮组

上行,以保持承船车上的船只处于水平位置。从布置选型来说,若上下游整体线路为一直线时,一般选用高低轮式、摇架式或链杆变腿车式;若上下游整体线路为一折线,可选用转盘式或岔道式;若上下游线路间有较

长的顶部水平段时,可选用双层车式.大型斜面式升船机,一般均宜采用下部为斜架车及上部为承船厢的湿运式方案。

垂直升船机 一般由上下游引航道、塔柱、承船厢、驱动机构、平衡系统、安全装置、电力拖动及控制系统等部分组成。垂直升船机的选型除对小型船舶采用干运、直接提升的型式外,对大中型船舶宜选用湿运的平衡重式。中国目前已建成的垂直升船机均为直接卷扬提升（如湖北省蒲圻、丹江口水利枢纽工程等），未设平衡重系统，所需驱动功率较大,耗电量大,运费贵。表 1 列出中国近年来设计研制的大型垂直升船机，均为湿运，其船厢运行方式或平衡方式虽不尽相同，但均采用钢丝绳卷扬提升和平衡重系统,具有足够的安全可靠性,并减小了驱动功率。其布置见图 2 及图 3。

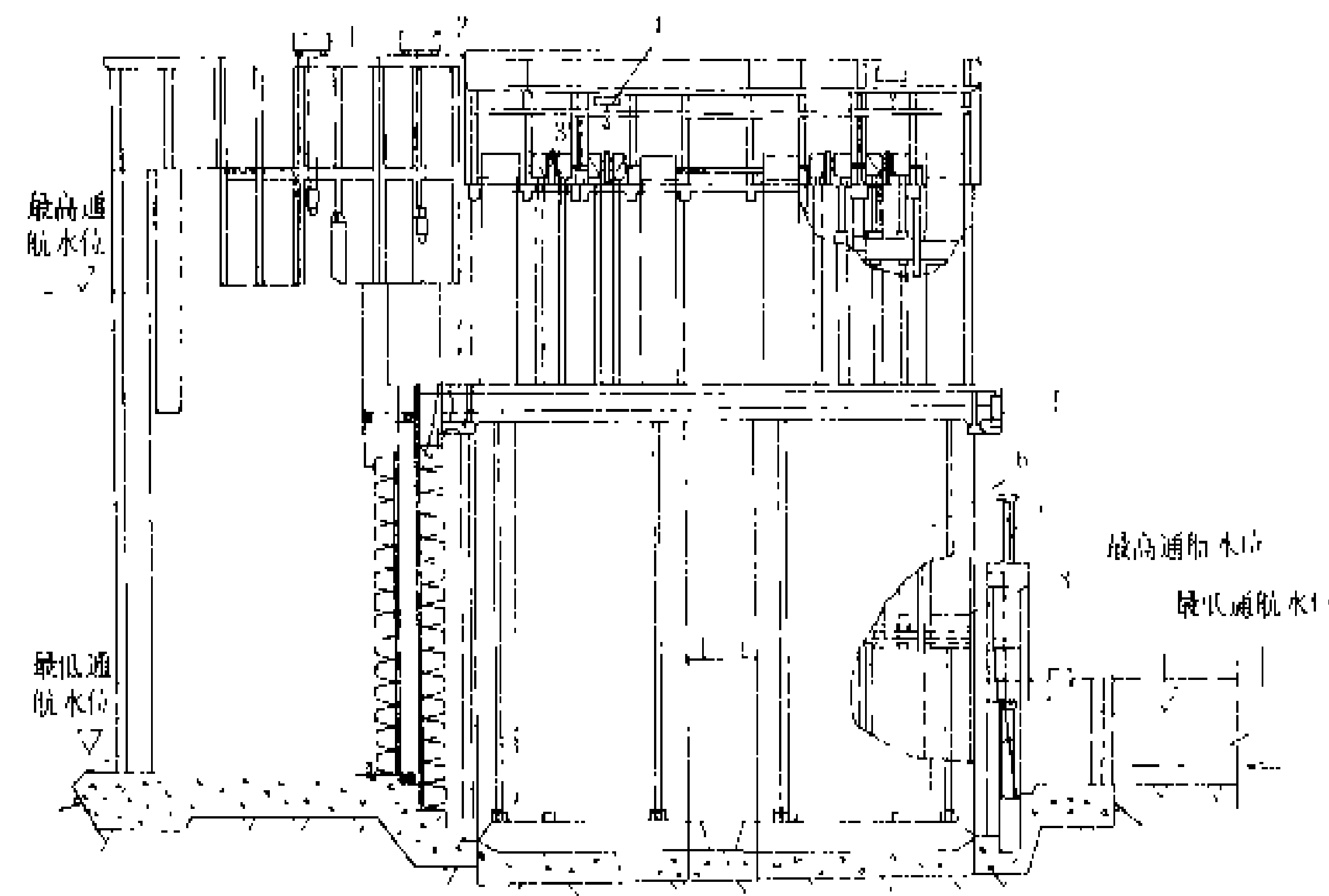


图 2 垂直升船机纵剖面图

1—上闸首辅助门及设备；2—上闸首工作门及设备；3—主机；4—检修起重机；5—承船厢；6—船厢导轨；7—平衡重；8—下闸首工作门及设备

表 1 中国近年正在设计研制的大型垂直升船机简况表

工程名称	型 式	最大提升高度 (m)	过船吨位 (t)	备 注
大 化	钢丝绳卷扬提升平衡重式、船厢下水	36.6	250	续建
岩 滩	钢丝绳卷扬提升平衡重式、船厢下水	68.5	250	
水 口	钢丝绳卷扬提升平衡重式、船厢不下水	57.4	2×500	
隔河岩	两级、钢丝绳卷扬提升平衡重式、船厢不下水	40+82	300	
三 峡	钢丝绳卷扬提升平衡重式、船厢不下水	113	3000	

表 2 国外近代建成的大型升船机简况表

序号	国 别	升 船 机 名 称	型 式	提升高度 (m)	最大过船吨位 (t)	建成 年代
1	德 国	尼德芬诺(Niederfinow)	平衡重式垂直升船机	36.0	1000	1934
2	德 国	罗腾塞(Rothensee)	浮筒式垂直升船机	18.7	1000	1938
3	德 国	亨利兴堡(Henrichenburg-Waltrop)	浮筒式垂直升船机	13.7	1350	1962
4	比利时	隆库尔(Ronquières)	纵向斜面升船机,1:20坡度	67.5	1350	1967
5	法 国	阿尔泽维勒(Arzviller)	横向斜面升船机,1:25坡度	44.5	350	1970
6	苏 联	克拉斯诺雅尔斯克(Krasnojarsk)	自行式纵向斜面升船机, 1:10坡度	101.0	1500	1967
7	法 国	蒙泰施(Montech)	水坡式升船机,1:33坡度	14.3	350	1973
8	德 国	吕内堡(Lüneburg)	双线平衡重式垂直升船机	38.0	1350	1975
9	法 国	枫斯拉诺斯(Fonserannes)	水坡式升船机,5%坡度	13.6	350	1983
10	比利时	斯特勒比-蒂厄(Strepv-Thieu)	平衡重式垂直升船机	73.0	1350	在建

注：表中除序号 9 外，均摘自德 H. W. Partenseky 《内河水道升船机》，1984 年版。

垂直升船机的驱动机构，目前有钢丝绳卷扬提升式和齿轮齿梯爬升式两种。比利时斯



特勒比-蒂厄 (Strepy-Thieu) 升船机的驱动机构系采用前者, 目前在建中。德国吕内堡 (Lüneburg) 垂直升船机则采用后者, 并于 1975 年建成投入运行, 情况良好。在中国上述二种驱动方式的垂直升船机均处于不同深度的设计研究和试验阶段。

发展概况 中国早在三国时期已出现利用人力或畜力沿斜坡拖船过坝的设施, 历代亦多有建造, 称“埭”、“堰埭”或“车船坝”, 实为斜面升船机的原始形式。近 20 多年来, 中国已利用现代技术相继建成中、小型升船机数十座, 分布于浙、鄂、赣、皖、粤、桂、川、贵等省区。其中以丹江口升船机规模最大, 上游为垂直、下游为斜面并带中间渠池的两级升船机, 共克服水位差 59 m, 过船吨位 150 t (下运)。

公元前 600 年, 古希腊已有利用斜坡拖船上岸, 运过科林斯地峡的实例。近代

(沈德民)

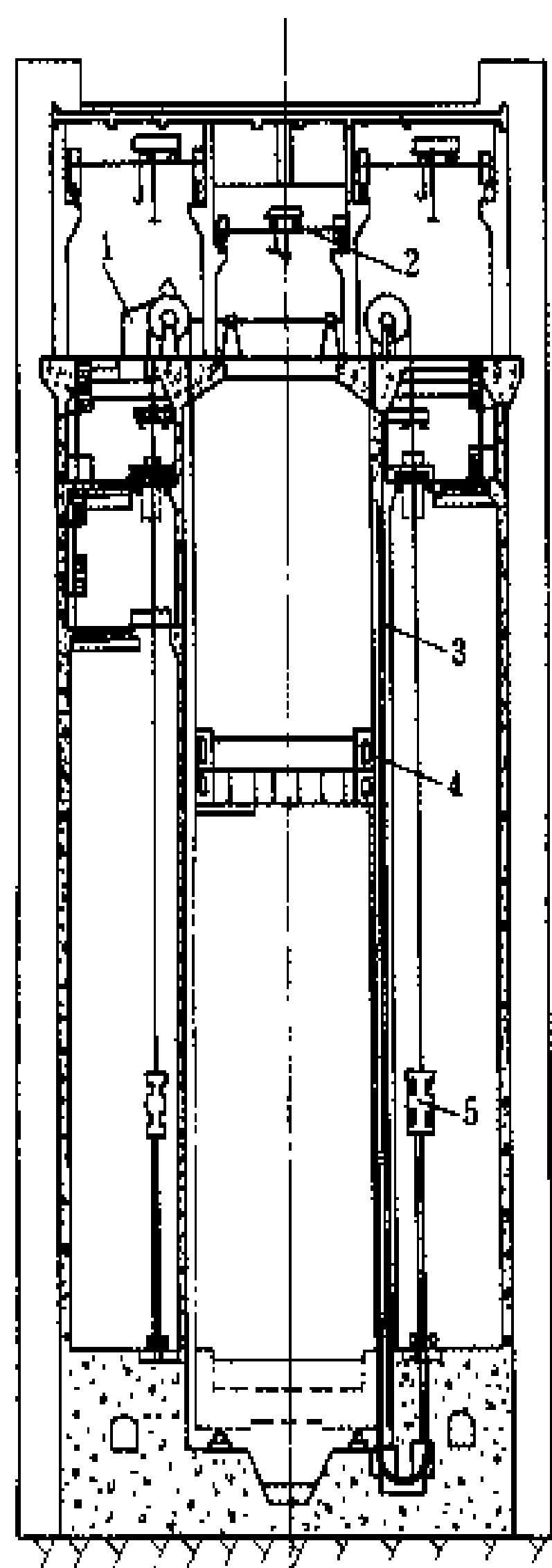


图 3 垂直升船机横剖面图

1 主机设备; 2 检修起重机; 3—建成的大型升船机见承重塔柱; 4—船厢; 5 平衡重系统

shigong celiang

施工测量 (construction survey) 为施工所进行的控制、放样和竣工验收等的测量工作。水电工程建设中的测量还包括水工建筑物和辅助工程的放样, 以及外部变形观测等。

施工控制网是施工放样测量的基本依据, 是整个施工区的专用控制。内容包括首级和加密平面控制、等级高程控制 (测量方法见平面控制测量、高程控制测量)。施工高程系统应与规划设计阶段应用的高程系统相一致。施工平面坐标系统若与规划设计阶段不一致, 应求出换算关系。当施工控制网的精度不能满足施工中某些局部工程高精度要求的平面放样, 可根据施工控制网的某点坐标和一条边的方位为依据, 布设小的独立网。施工控制网的边长应投影在建筑物的基准高

程面 (或平均高程面) 上。

施工放样是根据施工控制网将建筑物轴线 (中心线) 和轮廓点的平面和高程位置精确地从设计图上移至实地。水电工程建设放样内容有: 枢纽建筑物放样, 主要有水工建筑物如坝、闸、厂房、导墙、泄水建筑物等的开挖与填筑放样; 辅助工程如筛分、拌和皮带机、绞机等混凝土生产系统; 铁路、公路、桥的运输系统; 输电线路和管路系统; 围堰、戗堤等临时工程系统等的放样。为了正确放样, 应根据设计图件、有关文件数据与测量控制成果, 提前标出放样数据, 绘出放样草图, 并设计验核条件与方法, 以便现场放样与检验。平面位置放样的主要方法是由等级平面控制点测设轴线点, 再由轴线点测设建筑物轮廓点; 直线形建筑物放样控制可布设成包括主轴线 (或其平行线) 的方格网形式和由等级平面控制点直接测设建筑物轮廓点而采用的前、后方交会法, 电磁波测距极坐标法, 导线法和横基线尺视差法等。高程位置放样的方法有几何直接水准法或电磁波三角高程法。

特殊放样如隧洞贯通测量, 是经贯通设计后布设洞内、外平面与高程控制。洞内平面控制一般分为用于贯通测量的基本导线和用于施工放样的施工导线, 并按适当间隔埋设导线点。又如垂直构件安装、金属和机电安装、应用滑升模板浇筑混凝土的墩、柱建筑物等, 则应选用适当方法测设轴线、高程点和检校点, 并固定点位, 供施工中随时放样与检校使用。

在开挖与填筑放样中, 首先测定建筑物的轴线, 如河道、堤、道路放出中心线后, 除测出开挖与填筑的轮廓点, 还应测出各种边界和原始断面、收方断面和竣工断面, 供计算工程量。建筑物的浇筑过程中还应注意测定预埋件位置。

施工中为了垂直与水平位移、裂缝、倾斜与挠度观测等需埋设基点和观测设备。如垂直与水平位移观测基点、测点; 预埋安装正、倒锤线、引张线、连通管及固结观测的横梁式固结管或深式标组等。这些工作须随工程进度及时埋设, 并在施工期间开始进行观测。若遇洪水、地震等情况, 应加密测次, 为建筑物在蓄水前积累观测资料。

竣工测量包括测绘竣工地形图、断面图和建筑物体形与过流部位体形的测量, 外部变形观测设施的竣工图, 枢纽平面与高程控制成果和外部变形观测资料。

(茅玉清)

shigong changnei jiaotong

施工场内交通 (jobsite transportation for construction) 施工期间联系工地内部各工区、



生产及生活区之间和为施工需要临时设置的交通运输线路。

施工场内交通线路一般多属施工准备工程范畴,以公路作为主要交通方式。公路适应性强,机动灵活,投资省而建设快,可以修建不同标准和技术要求,以适应施工需要。通常交通量大和运输特别繁忙的场内交通干线,都要避开生活区,减少与场内铁路或其它道路的交叉,对运输强度高和行车密度大的交通线,常布置成环行线。

根据不同用途设置的施工场内交通线,通常有:截流线、运料线、上坝线、混凝土运输线、出渣线、过坝线、场内交通线等线路及跨河设施。

(1)截流线。施工截流是控制总工期的关键,因此截流时自截流料物储存场至龙口都设专用交通线,其特点是路面宽、承重大,能适应合龙抢堵时各种重型车辆设备和重件的特殊运输要求。

(2)运料线。土、石或砂砾料源往往距坝址较远,通常都设运料线,其标准根据运输机械、运输强度和地形地质条件选定。除公路外也有采用铁路、连续运输的带式输送机或架空索道等作运料线。

(3)上坝线。当地材料坝施工中运送坝料至工作面的临时交通线,随着坝体的升高,线路位置亦相应变更并与运料线相连接。

(4)混凝土运输线。混凝土坝施工中运送混凝土熟料(即拌和出料后尚未入仓的混凝土)的专用线,除公路外也常采用铁路从拌和楼将混凝土运至坝址,一般在坝址设混凝土运输栈桥或缆索起重机,将混凝土垂直提升运送入仓。

(5)出渣线。是控制地面或地下工程出渣强度的关键,根据施工方法和运输设备、出渣强度选择,有时限于施工条件(如基坑出渣的高差大、线路短、展线困难等)常在保证施工安全前提下降低线路技术标准。在中、小断面的地下工程开挖中,也常采用窄轨铁路出渣。

(6)过坝线。为解决坝址上、下游当地物资通过坝区与施工的干扰,在通航、过木河道常设临时过坝措施,如升船设施、过木筏道,形成特殊的过坝交通。

(7)场内交通线。为解决各工区之间及生产、生活区的人员交通,料物、设备的储存、中转、集散,以及场内消防、救护和小搬运等需要,需设置场内交通线。一般根据不同运量、运输强度、交通工具和使用时间等因素选择不同技术标准和材料、结构。

(8)跨河设施。水电站工地为沟通两岸,通常都有跨河设施。桥梁和渡口一般都选在坝址下游河道顺直岸坡稳定两岸有适当滩地且不影响坝体和厂房施工的位置。在电站竣工后不拆除的桥梁,还要考虑对电站尾

水的影响。

(王守道)

snigong daoliu

施工导流 (construction diversion) 在河道中修建水工建筑物,为创造干地施工条件而采取的围护基坑与引导河水下泄的临时性工程措施。基坑是由围堰所围出的一个与水流隔开的施工场地。排除基坑中积水后,就可形成干地施工条件。按不同的施工导流方式,围堰或拦断全部河道或占据河道的一部分。前者河水通过预先建成的导流泄水建筑物所形成的通道下泄;后者,河水通过堰外的原河道下泄。导流方式选择是水电工程施工的关键问题之一。导流泄水建筑物主要有隧洞、明渠、涵管、底孔及渡槽等。围堰和导流泄流建筑物都是临时性工程。施工导流改变了河道的正常状态,因而在施工导流期间,除应进行河岸防护、排冰、排砂和满足下游供水等问题外,对有通航、过木要求的河道,还要解决施工期河道通航、过木问题。

施工导流阶段划分 包括三个阶段。

(1)第一阶段。常称初期导流。主要指围堰挡水阶段,即从河道截流到主体建筑物具备一定的挡水和泄水能力之前的阶段。这期间,主体工程完全在围堰保护下施工,如果发生超设计标准的流量,基坑过水淹没,施工停止,直到洪水过去,基坑排水后方能恢复施工。

(2)第二阶段。为主体建筑物临时挡水阶段。从全部或部分主体建筑物达到一定的临时挡水高程时起,直到主体建筑物参与拦洪渡汛或自身具备宣泄洪水的能力承担施工渡汛任务时为止。

(3)第三阶段。为施工蓄水阶段,又称后期导流阶段。即由主体建筑物挡水的阶段。此期间各导流泄水建筑物相继下闸或封堵。除满足下游用水或其他要求而少量泄水外,水库进行全面蓄水。对利用围堰提前蓄水发电的工程,发电初期仍为围堰挡水。

施工导流方式 有断流围堰导流和分期围堰导流两种基本方式。施工导流方式选择要根据坝址地形地质、河道情况、主体建筑物特点、当前施工技术水平和施工力量等综合分析决定。

(1)断流围堰导流。较适用于窄河床工程,特别是对土坝、拱坝等要求整体平起不宜分期施工的工程常采用这种导流方式。一般是先在岸边修建明渠或开挖隧洞,或在河床中布置涵管等导流泄水建筑物,然后在拟建的主体建筑物上、下游横河修建围堰,全面截断天然河道的水流,迫使河水改为由明渠、隧洞或涵管等下泄。主体建筑物在上、下游围堰围出的基坑中施工。如中国龙羊峡水电站为混凝土拱形重力坝,座落于窄深

峡谷中，采取断流围堰配合右岸隧洞导流的方式，见图1。

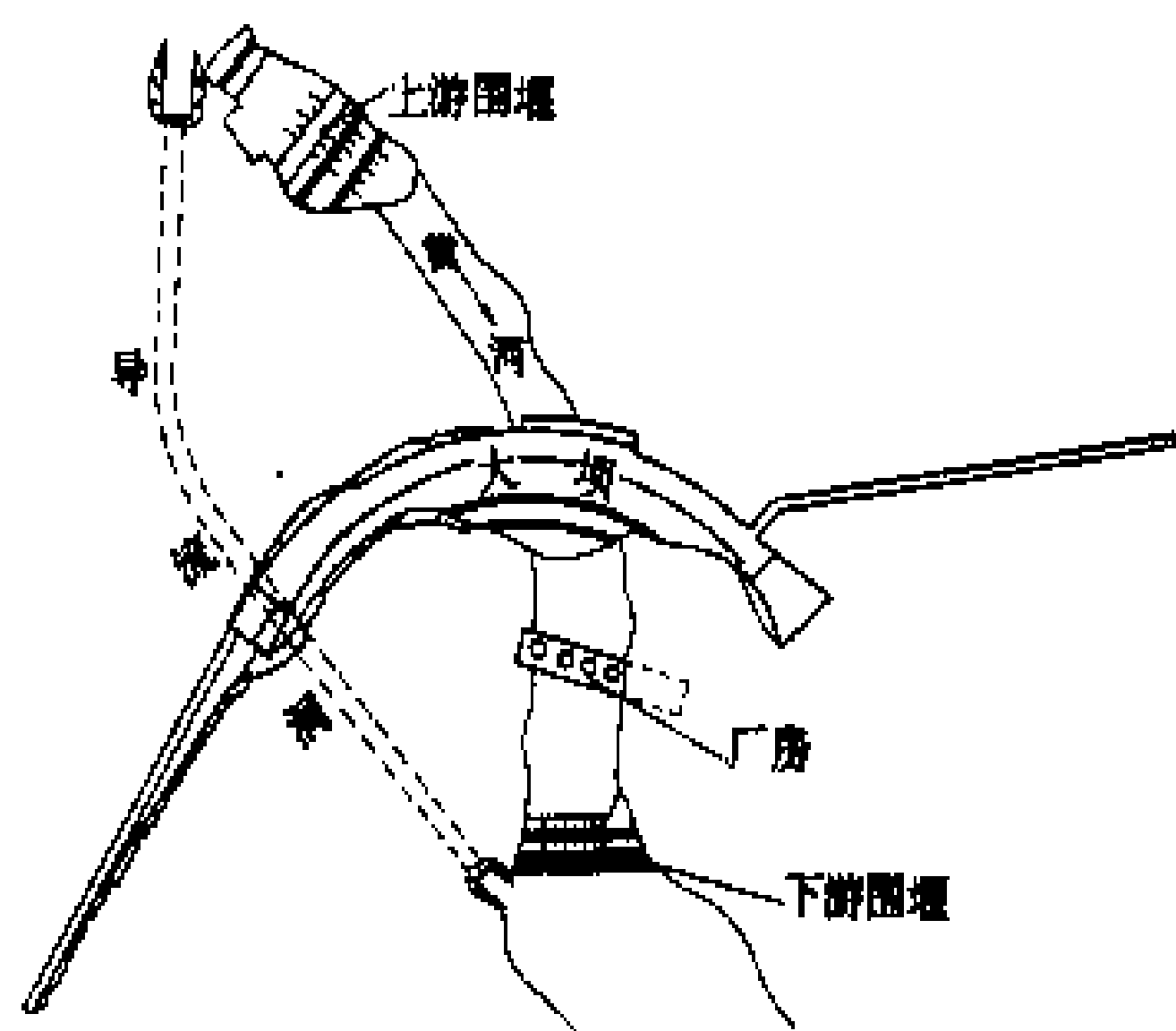


图1 黄河龙羊峡水电站施工导流布置图

(2) 分期围堰导流。较适用于宽河床、大流量的情况。一般先靠一岸修建上、下游横向围堰及顺河纵向围堰构成第一期施工基坑。水流由基坑外束窄了的河道下泄。当一期基坑的主体工程达到一定的挡水能力，为

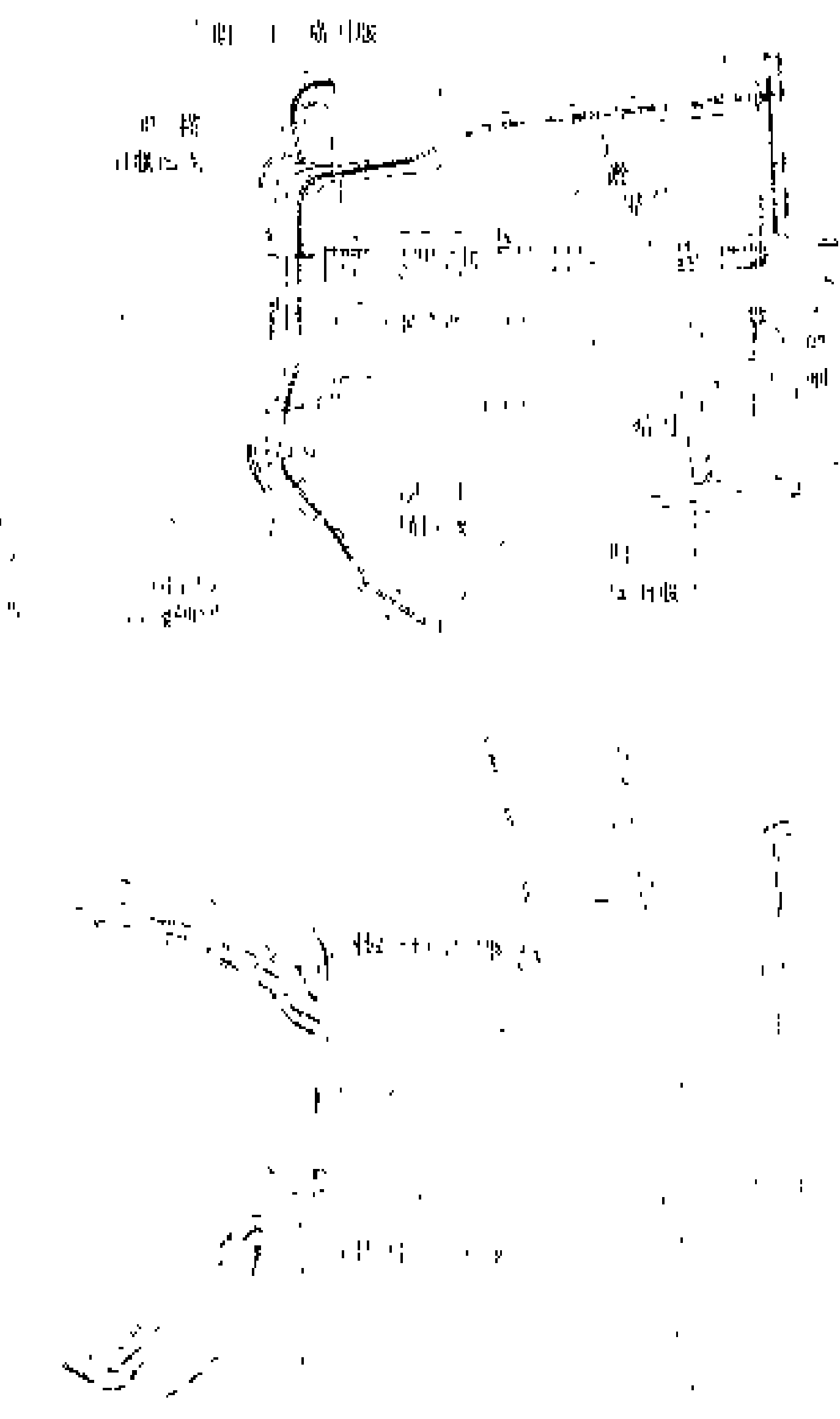


图2 葛洲坝水利枢纽工程施工导流布置图

(a) 一期导流平面布置图；(b) 二期导流平面布置图

后期工程的导流泄水通道已经建成时，拆除一期围堰，改围另一侧河床，使水流由前期基坑中预先建成的导流泄水通道下泄。此后，后期基坑中的主体工程进行施

工，前期基坑中的主体工程或者继续施工，或者全部（或部分）投入运用。当主体工程具备挡水、蓄水及泄水能力后，即封堵导流泄水通道，进入施工导流第三阶段。中国葛洲坝水利枢纽，挡水前缘长2561 m，分两期导流，第一期围二江及三江，建泄水闸、河床式厂房及船闸。第二期大江截流，利用二江及三江主体工程泄水，同时二江电厂投入正常运用。此后，大江工程全面施工，直至竣工（见图2）。

导流工程设计洪水标准 导流工程设计洪水标准各国的具体规定不同，一般包括施工导流建筑物的设计洪水标准、坝体建筑物临时渡汛洪水标准和导流泄水建筑物封堵后坝体渡汛洪水标准等。

表1 水工建筑物级别划分

永久性建筑物级别	导流建筑物级别
I	IV
II	IV
III	V
IV	V
V	V

(1) 施工导流建筑物的设计洪水标准。中国根据施工导流建筑物的类型和级别确定其洪水标准。中国SDJ12-78《水利水电枢纽工程等级划分及设计标准》规定按拟建的永久建筑物的级别相应地确定其

导流建筑物的级别，见表1。

中国SDJ338-89《水利水电工程施工组织设计规范》规定的导流建筑物设计洪水标准，见表2。

表2 导流建筑物洪水标准划分

导流建筑物类型	导流建筑物级别划分		
	II	IV	V
	洪水重现期(年)		
土石	50~20	20~10	10~5
混凝土	20~10	10~5	5~3

(2) 坝体建筑物临时渡汛洪水标准。当坝体修筑高到不需围堰保护时，就由它自身临时挡水，称为坝体施工期临时渡汛阶段。中国水利水电工程施工组织设计规范对坝体施工期临时渡汛阶段的设计洪水标准的规定见表3。

表3 坝体施工期临时渡汛洪水标准

坝型	拦洪库容(亿 m ³)		
	>1.0	1.0~0.1	<0.1
	洪水重现期(年)		
土石坝	>100	100~50	50~20
混凝土坝	>50	50~20	20~10

(3) 导流泄水建筑物封堵后坝体渡汛洪水标准。当

永久泄洪建筑物尚未具备设计泄洪能力，坝体进入拦洪、蓄水阶段。此时要求坝体修建的高度超过施工期间同期的设计拦洪及蓄水水位，其帷幕灌浆及接缝灌浆高程也应能满足蓄水要求。中国水利水电工程施工组织设计规范规定导流泄水建筑物封堵后坝体渡汛洪水标准见表 4。

表 4 导流泄水建筑物封堵后坝体渡汛洪水标准

大坝类型		大 坝 级 别		
		I	II	III
		洪水重现期（年）		
混凝土	设 计	200~100	100~50	50~20
	校 核	500~200	200~100	100~50
土 石	设 计	500~100	200~100	100~50
	校 核	1000~500	500~200	200~100

导流时段的选择 洪水标准确定之后，导流的设计流量值取决于导流时段的选择。由于有些河道洪枯流量相差极大，同标准的洪水期流量可能是枯水期流量的十余倍乃至几十倍。同样，在枯水期里紧接汛前或汛后的月份，其流量较枯水中期大许多。为了减小导流泄水建筑物的规模有些工程第一阶段不采用基坑全年施工，而是通过导流方案和主体工程施工方法、施工程序、施工进度研究，选择适宜的基坑施工时段，既能满足主体建筑物施工的工期要求，又能减少导流时设计洪水流量，从而减少施工导流工程的工程量。这是导流设计的一项重要工作，称为导流的时段选择。

导流工程施工 第一阶段的施工程序是先修导流泄水建筑物，如隧洞、明渠、涵管等（或利用原河床导流）后修围堰。围堰一般安排在枯水初期小流量时开始施工。

围堰种类和施工方法非常多，对于横向围堰多数是先修戗堤。戗堤是用石碴等颗粒体材料由岸边用进占法向河心堆筑的透水堤。戗堤堆出水面并在龙口合龙后（见截流），在其临水面铺筑防渗材料止漏，称为围堰闭气。这是围堰的基体，此后继续加高，直到围堰完成。横向围堰的另一种施工方法是先修一个低围堰挡水，再修建工程需要的高围堰或过水围堰（见围堰）。

分期导流的纵向主围堰一般是前、后期共用，穿越主体建筑物的部位，要与主体建筑物结合。纵向围堰位置如果是在水中，一般要先修一道小围堰挡水以形成修建纵向围堰的条件。分期导流须先在一期工程修建好导流泄水通道，拆除一期上、下游横向围堰后二期围堰才能截流。

第二阶段导流要充分考虑和利用主体建筑物所达

到的临时挡水和防洪渡汛能力。第三阶段导流要根据水情预报和当年下游供水要求，选择封堵导流泄水通道的时间和措施。

（章景安）

shigong duiwai jiaotong

施工对外交通 （construction access） 施工工地与外部联系的主要交通线路。通常指从已建铁路站场、城镇或港口码头运输物资设备至工地的专用交通运输干线。

施工对外交通方式有公路、铁路、水运和空运四类，其运输能力应能满足工地各施工期物资的高峰运输要求，安全可靠，中转环节少，运输损耗低，运输费用省。

公路 专用公路从已有铁路站场、城镇或港口码头开始至工地总仓库止。选线时要结合地区规划和经济发展要求决定走向，并尽量利用当地已有公路、桥、隧等设施。在满足工程施工期高峰运输强度前提下，需考虑水电工程特有的超限超重件的运输措施。通常在外来物资运输方式变换地点设置转运站，且都在铁路站场或港口码头附近，包括仓库、料棚、堆场、管理和生活用房，以及必要的起重堆运设备等。转运站规模根据物资来源、种类和到货情况确定。以公路作施工对外交通，能适应复杂的地形地质条件，满足各种行车密度要求，可以单独解决施工期的全部对外运输任务，建设速度快，费用低，运输管理简单，运输机动灵活，是水电站施工各国普遍采用的对外运输方式，其适应范围自数十公里至数百公里不等。但要经常维修保养，且油耗大，车辆损耗大，单位运价较高。

铁路 专用线一般采用标准轨距，中国的标准轨距为 1435 mm，从已有的铁路网或其他工业企业专用铁路站场接轨，至工地电站厂房内止，主要运送大宗外来材料和超限超重设备；结合地区近远期规划，根据地形地质条件选线设站。若采用非标准轨距铁路，则在两种轨距转换处要设转运站。铁路的运输能力大，可靠性强，运输单价低，外来器材（如散装水泥）可自产地直接运至工地仓库，减少中途装卸及转运储存等损耗。在工程竣工投产后，常留作以后电站机组回厂检修运输应用。但铁路建设要求技术标准较高，运行管理复杂，建设周期长，建设投资大，占地多且一般不能单独承担全部对外交通任务，零星器材、紧急物资以及人员往返常因受铁路调度限制仍需公路配合。

水运 在原有通航河道上加设专用码头或改善河道航运能力，以满足工地对外交通要求。一般在有水运条件的工地均要充分利用。但河道航运能力往往受季节影响较大，因此，虽然水运与其它对外交通方式比



较,运输能力最大,单位运价最低,需增加的建设投资最省,但在水电站施工中除特殊情况外,一般只作为辅助对外交通线,主要运输任务仍需公路解决。

空运 在偏僻山区采用其他对外交通方式明显不经济,或工地急需某种物资和抢救伤员需要临时紧急运输时,才采用空运。空运距离一般自附近城镇已建空港至工地临时简易机场止,常以直升飞机作为运输工具。

(王守道)

shigong gangchang sheshi

施工工厂设施 (constructional plant and facilities) 为施工服务的生产系统、工厂、车间和辅助设施,又称施工辅助企业。施工工厂设施包括土、砂、石开采与加工系统;混凝土生产系统;压气、供水、供电和通信系统;机械修配和加工系统等。它的任务是制备施工所需的各种半成品和成品材料,供应施工动力和水,建立工地内、外通讯联系,进行施工设备的保养、修理和加工制作少量非标准件、零配件与金属结构,使工程施工能顺利进行。

土、砂、石开采与加工系统 主要由采料场和砂石厂等组成。

采料场 包括土、砂、石料料源的选择、布置和开采。有关料场规划要求及开采方法,见土石坝施工。

砂石厂 生产、供应混凝土骨料的工厂,一般包括破碎、筛分、清洗3个工艺环节。

(1) 破碎。生产人工碎石料时,首先要将爆碎后的石块进行粗碎、中碎、细碎数段加工,采用的机械设备有旋回式、圆锥式、颚式、锤式、反击式、棍式等碎石机,在工艺设计时根据石料的岩性和颗粒尺寸合理选用。生产人工砂时,还需再经过磨砂工艺过程。

(2) 筛分。采用振动筛、圆筒筛与格筛等筛分机械,将已经破碎的石料或天然砂砾石,按要求的级配筛分成不同粒径级别的各种成品料。

(3) 清洗。对碎石或卵砾石等粗粒料,一般在筛分过程中用压力水进行冲洗,以清除料物中含有的粘土、淤泥、有机物等杂质。对人工砂或天然砂等细粒料,则须通过沉砂箱、链板洗砂机或螺旋分级机等机械,经过冲洗、分级、脱水,除去污物和杂质后,才能成为成品料供工程使用。

混凝土生产系统 包括贮料、输送、配料、拌和、出料等成套设施所组成的系统,如骨料堆存输送系统;水泥储存输送系统;混凝土配料和拌和系统;制冷、供热系统;掺和料和外加剂系统等。

骨料堆存输送系统 为保证混凝土拌和楼连续生产而设立的骨料贮存和输送设施所形成的系统。骨料

由砂石加工系统成品料仓运来,经受料仓、胶带输送机、堆料机或卸料小车按不同规格分别堆存。储存方式一般采用露天分格,受场地条件限制时,亦常用料罐贮存。贮料场的布置,应充分利用地形条件,尽量减少工艺环节和设施,并尽可能缩短至混凝土拌和楼间的输送距离。储存量应按混凝土供应计划核算确定。

水泥储存输送系统 混凝土系统内通常设有机械化装卸的罐式水泥仓库,其贮存量按混凝土高峰生产量、水泥供应方式与可靠性等因素来确定。当采用散装水泥时,可用专用散装水泥车由受料库或中转库将水泥运来,由压缩空气卸料入库。如采用袋装水泥,则应设置袋装水泥库与拆包间,水泥经拆包后输入水泥罐。水泥输送方法,一般以压缩空气输送为主,或配合以螺旋输送机和斗式提升机等机械。

混凝土配料和拌和系统 一般由称量配料设施和搅拌设施二部分组成。采用混凝土拌和楼时,配料层与拌和层采取垂直布置,采用电-气程序控制,由电子自动称量装置按混凝土生产的配比要求,分别对水泥、掺和料、砂石骨料、水和外加剂等进行称量,并将配称好的各种材料按程序分批送入拌和机进行拌和。对于小型工程一般采用简易拌和站,称量配料与拌和设施是分开设的,由人工或机械配料,将按级配配制好的骨料与水泥放入拌和机受料斗,下料时再加入配好的水与外加剂,由中、小型拌和机拌制成混凝土。拌和机的选用,应根据混凝土品种,骨料最大粒径与装运混凝土的料罐容量等多种因素来确定。

制冷供热系统 根据不同气候条件与工程对混凝土的不同温度要求而设置的控制混凝土温度的设施。在寒冷地区进行混凝土冬季施工时需加热水拌和或将骨料预热,使混凝土浇筑温度符合设计的要求。骨料预热可在料堆或预热料罐,或拌和楼料仓内采用蒸汽管道或热风等方法进行。供热系统一般由锅炉房、预热料仓(料罐)及供热管道、热风机等组成。在夏季施工或由于混凝土温度控制措施需要,要求降低混凝土出机口温度时,可根据混凝土要求降温幅度的大小,采用加冷水、加冰、对骨料喷淋冷水和在料仓内通冷风进行预冷等措施。制冷系统一般包括制冷设备、制冷水和制冰设备、贮冰库、冷风机及水处理等设施。此项制冷系统还可供应坝体冷却需用的冷却水。

掺和料和外加剂系统 为改善混凝土性能,减少水泥用量,常采用加掺和料和外加剂。水工混凝土掺和料一般有矿渣、粉煤灰及火山灰质材料等,以掺粉煤灰为多。在现场掺和方法有干法与湿法二种,以干法为主。干法进料与水泥相同,按掺量比例与水泥同时进入拌和机,但要另设料罐、料仓与输送系统,不能与水泥共用一套,以免串通混杂。湿法系将粉煤灰与水分别



计量后放入拌浆桶搅拌,然后输入贮浆罐,通过管道输入拌和楼内配浆桶,经称量后进入拌和机。外加剂按其功能大致可分为减水剂、加气剂、缓凝剂、速凝早强剂等类。外加剂一般以液体或干粉状成品运抵工地,在混凝土系统的配制车间中进行稀释或溶解成规定浓度的溶液,通过管道及耐酸泵送到拌和楼内的外加剂贮存箱,经过称量与水同时进入拌和机。在简易拌和站内,一般用人工以体积计量与水同时掺入。

施工工厂和设施除上述几个系统外,尚有压缩空气、供水、供电、通信系统,机械修配与各种加工厂等,可按工程施工与生活需要,确定其规模与供应范围,分别设置。

(龚青杰)

shigong gongdian

施工供电 (power supply for construction)

供应水电站施工生产用电的系统。其主要内容:①施工系统用电负荷分析计算;②确定施工电源;③根据选定的电源方式进行电气设计;④施工供电网络规划,包括配电网络总体规划,确定配电所及配电线路基本参数;⑤提出施工供电网络接线、主要设备清单及编制说明书。

施工电源 通常采用以下几种方式供电:①利用提前架设的永久送电线路由系统供电,施工期间降压运行。②利用提前架设的永久配电线路由地区电网供电,施工完成后留作电站厂用电外来备用电源。③柴油发电机供电,但成本较高,故只在中、小型工程且无其他电源时采用,对于大型水电站也可用柴油发电机作为施工供电的备用电源。④采用移动式电站:如列车电站、船舶电站等,但需要修筑进入施工现场的铁路和具备可通航航道的条件。⑤主体工程施工前先修建小水电站作为施工供电电源。选择施工供电电源方案时应考虑经济、灵活、可靠、保证施工顺利进行等因素,经过技术经济比较和论证后确定。

施工供电负荷 通常采用单位负荷产量法进行计算,用需要系数法进行校验。单位负荷产量法是以水利水电工程施工用的工厂设施单位产量所需负荷的经验数据和施工进度为依据,绘制施工期用电负荷曲线,由高峰负荷即可确定施工电源容量。需要系数法是根据各施工用的工厂设施有关用电设备的总容量,乘以总的需要系数即得施工用电最大需要负荷。一般情况下,大型水利水电工程的需要系数可取 0.25~0.35;中型水利水电工程的需要系数可取 0.35~0.55。随着施工技术水平的提高,单位产量所需负荷将会下降,而需要系数将会提高。

(邱景安)

shigong jiaotong yunshu

施工交通运输 (construction transportation)

工程施工期内运输方式、运输路线和运输管理工作的统称。水电站施工交通运输分对外交通和场内交通两部分。

对外交通 从已建公路、铁路、城镇、码头运输外来物资设备至施工工地的交通干线。通常在施工期间自成运输管理系统,运输量和运输强度相对比较稳定。水电站竣工后大都留作永久对外交通线路。水电站施工的对外交通运输方式有公路、铁路、水运和空运四类。①公路是各国水电站施工普遍采用的对外交通运输方式,其优点建设标准不高,运输机动灵活,适应复杂地形地质要求,能满足施工中各类设备和物资运输,建设投资小,运行管理简单,但单位运价较高。②铁路运输是从已有的铁路站场接轨,其优点运输能力大,单位运价低,外来器材减少装卸转储损耗,但线路建设造价高,且不能单独承担工地全部对外交通运输任务。③水运在工地附近有通航河道时采用,并须设专用码头,其优点为投资省,运输能力最大,运费最廉,但易受季节影响,在水电站施工中一般只作为对外交通的辅助运输设施,还需设公路才能解决全部对外运输任务。④空运只在交通十分不便,采用其它运输方式显然不经济或工地急需某种器材设备的临时对外运输措施,大都采用直升飞机,起飞点借用城市已有空港,工地不特设机场。(见施工对外交通)

场内交通(见施工场内交通)联系工地内部各施工区间和为施工设置的临时交通运输,运输量和运输强度比较复杂,有外来物资转运,大量土石方搬运,混凝土浇筑及设备安装运输等,这些运输任务多与施工进度直接联系,运输时间和运输强度要求不同,运输方式和运输设备各异,而且由于水电站建设周期长,高峰强度大,重型车辆多,行车密度大,工区地形复杂,且场内交通线路在施工完毕后又大多废弃,即使部分留用,其运输量也将锐减,因此通常多采用临时公路运输方式,尤其在高差大,展线困难的地区(如基坑出渣线),往往难以满足规范要求,因而在保证施工安全、满足运输强度的前提下常降低规范要求的标准。其它场内交通方式有铁路运输和连续运输。前者常用于中、小断面隧洞出渣,砂砾料开采,混凝土熟料运输,但轨距宽窄不等,且各自成系统。后者常用带式输送机运输散粒料、土料或混凝土熟料。(见施工场内交通)

(王守道)

shigongqi duxun

施工期渡汛 (flood protection in construction period)

汛期施工的防洪规划及其实



施。包括防洪规划、防洪准备、工程保护与基坑渡汛四个方面。

(1)防洪规划。根据施工组织设计和施工导流各阶段的要求，按照建筑物的等级、施工条件、防洪要求以及对下游主要工矿企业和城市的影响，提出渡汛措施和实施计划。

(2) 防洪准备。包括：建立防洪组织；设置水文、气象和洪水预报系统；建立防洪通讯设施；备好防洪安全电源；准备防洪器材、物资及机械设备；调查落实可能产生山洪、泥石流的地段并提出报告；对库岸及堤防进行安全检查等。

(3)工程保护。有两个方面。一是对工程生产区和生活区的保护，使生产设施、施工场地、居民点和水管路等免受淹没，做好排水设施等。二是保证汛期工程的施工条件，主要有：①保持道路畅通，必要时设置漫水桥、漫水路面或加高路堤等渡汛交通措施。②预先备足施工用材料、将机械设备转移到安全工作位置。③准备将发生不可抵御的超标准洪水时的应急抢险力量等。

(4) 基坑渡汛。根据导流方案采取相应措施。一般在基坑过水前要充水，以便形成水垫，减少落差，保护围堰。下游要有排水装置以减少基坑淤积量和恢复基坑时的抽水量。主体工程要安排好汛期施工进度计划，做好工程量及施工强度的平衡。基坑过水要预留过水通道。对过水面采取保护措施，如：混凝土面应具有足够的龄期强度；堆石体应复核其抗冲流速。加强水情预报，保证过水前人员及器材设备能及时撤退，并为汛后基坑恢复工作创造有利条件。

(章景安)

shigong sheji hongshui

施工设计洪水 (construction design flood)

符合水电站施工设计标准的洪水。为水利水电工程施工导流、施工进度安排或其他施工期防洪要求的设计依据。施工设计洪水包括年最大设计洪水及年内各分期的设计洪水。年最大设计洪水用于围堰、导流洞或坝体挡水的防洪设计；分期设计洪水用于考虑施工进度安排、施工截流期等的选择。中国 1978 年颁发 SDJ12-78《水利水电枢纽工程等级划分及设计标准》对临时性水工建筑物及坝体施工期临时渡汛的洪水标准作出了规定，见表 1 及表 2。

施工设计洪水的计算内容包括设计洪峰流量、洪量及设计洪水过程线。当施工设计洪水采用年最大设计洪水时，其计算方法同设计洪水。分期设计洪水的计算方法，一般也是采用频率计算法，从各年资料中选取施工时段中的最大洪峰、洪量进行频率计算。分期的划

分，除根据施工设计的要求外，还要考虑洪水的不同天气成因及洪水季节变化的规律。分期时段不宜过短，一般不短于一个月，分期洪水的选择方法有不跨期和跨期两种。不跨期选样时，若一次洪水过程位于两个分期，则视其洪峰或时段洪量主要位于何期，即作为该期的样本而不作重复选样。跨期选样时，跨期的幅度一般不超过 5~10 天。有历史洪水时，按其发生的日期，加入在该分期洪水的系列中进行频率计算。施工洪水的洪水标准较低，当具有较长资料系列时也有直接采用经验频率值的。

表 1 临时性水工建筑物洪水标准

建筑物类型	建 筑 物 级 别			
	2	3	4	5
	洪 水 重 现 期 (a)			
土石建筑物	>50	50~30	30~20	20~10
混凝土浆砌石建筑物	>20	20~10	10~5	5~3

表 2 坝体施工期临时渡汛的洪水标准

坝 型	拦 洪 库 容 (亿 m³)		
	>1.0	1.0~0.1	<0.1
	洪 水 重 现 期 (a)		
土坝、堆石坝、干砌石坝	>100	100~50	50~20
混凝土坝、浆砌石坝	>50	50~20	20~10

由于分期洪水的年际变化较大，分期历史洪水又难以调查考证，因此其计算成果误差较大。对分期设计洪水成果，一般都要作合理性检查，分析各分期洪水的统计参数和同频率设计值的年内变化规律，并与年最大洪水的统计参数和同频率设计值进行比较。使用分期洪水成果，由于样本选择方法的不同，成果使用也不同。使用不跨期选样的成果，当邻期的设计值大于本期的设计值时，可将邻期成果移用于本期的一定时间范围内，其移用范围一般不超过 5~10 天。

(顾传智)

shigong zongbuzhi

施工总布置 (construction general layout)

工程施工所需的场地、交通、建筑物、施工工厂设施等的总体布局。施工总布置要根据永久建筑物的布置及工程特点，结合施工条件和工程所在地区的社会、经济、自然条件等，统筹安排施工所需场地和各类设施的分区规划、平立面布置以及相互间的联系。在安



排时,要遵循因地制宜、因时制宜、有利生产、方便生活、易于管理、安全可靠、保护环境、经济合理的原则。同时还要解决好内部与外部、主体工程与临时设施、施工生产与生活福利、平面布置与立面高程、施工初期与后期等方面的关系。为了做好施工总布置,常需进行多方案的比较。通过方案比较,经全面系统论证,选定施工总布置方案,对保证工程质量、加快施工进度和降低工程造价具有重要作用。在规划设计以至施工各个阶段,都要进行施工总布置工作。其最终成果通常采用施工总平面图的形式。

主要内容 水电工程的施工总布置一般包括:①施工临时设施项目的划分、组成、规模和布置。②对外交通线路及其与交通干线的衔接、运输里程和站场位置。③场内交通主要线路和设施的布置及其与对外交通的联系。④施工分区规划,包括主体工程施工、施工工厂设施、大型临时设施、当地建筑材料开采、工程弃料堆放场地等分区范围。⑤机电设备、金属结构和大型施工机械安装场地。⑥风、水、电供应通信及其他动力厂站位置及主干管线。⑦转运站、码头、仓库等储运设施。⑧施工管理机构及各施工工区的位置和范围。⑨生活福利商业服务设施及其他建筑物的位置和范围。⑩采用招标方式并由几个单位分包施工时,划定各分包单位的施工区域。⑪荒地滩地的利用、造地还田以及有关环境保护和绿化的规划。

为进行施工总布置方案比较,还要考虑的因素有:①内外交通的主要指标,包括工程量、造价、运费及运输设备的需用量。②各项临时工程的工程量。③土石方平衡计算成果、场地平整的上石方工程量和形成时间。④施工征地范围和占地面积。⑤有关施工征地移民的各种指标等。

在施工总平面布置图上,除上述各项内容及有关工程量等指标外,还要标明:①工程地理位置和对外交通示意图、简明运输里程表。②坐标系、风玫瑰,必要的地形、地物等。③主体工程和导流建筑物的位置及轮廓。④生产、生活福利设施及其他建筑物一览表。

布置要点 水电工程的施工总布置,根据工程类型特点、施工场地和交通条件及施工组织形式,可采用集中、分散或混合式的布置方式。例如,对外交通方便,工地附近有足够的地带可满足施工总布置需要,工程相对集中的坝式水电站,宜采用集中式布置。工程项目分散,场地零星分布,交通相对困难的引水式水电站,可采用分散式布置。通常根据工程和现场条件,多采用适当集中和局部分散的混合式布置。进行施工布置时还需考虑:①对外交通和场内交通是工地与外部联系及场内各分区之间联系的纽带,要作为一个系统,使现场形成有机整体,既可适应工程施工需要,畅通方便,

又能合理组织运输,节省基建和运营费用。②尽量利用现有水电建设基地和当地已有的工业企业为施工服务,减少施工工厂设施的建筑面积。③充分利用拟建的永久性生产生活建筑、设施、道路、供电与通讯线路以及给排水工程等,尽量提前修建,供施工期使用。④各类建筑和设施要避开严重不良地质、滑坡体和可能受到泥石流、雪崩等危害的地区。⑤布置各类建筑、设施和重要的场地时,要按规定的标准,考虑防洪渡汛的措施,尽量将建筑物或临时设施布置在洪水位以上。⑥施工布置要适应从准备工程到竣工的各个施工阶段的需要。从高程上也要适应基坑施工初期到大坝完工各阶段的需要;在库区初期蓄水位以下,尽量不要布置施工临时设施,特别是后期还要使用的设施,以免蓄水前还要拆迁。⑦选定弃渣场地时,要考虑不致因弃渣影响河道行洪,或抬高尾水影响发电出力。⑧充分利用荒地、滩地,减少平整工程量,注意节约用地,不占或少占农田,有条件时造地还田。⑨各处施工场地,尤其是主要施工工厂设施和生活区,都要做好场地排水和污水排放措施。⑩符合有关安全、防火、卫生、环境保护等方面的规定。

(王庭济)

shigong zong jindu

施工总进度 (general schedule of construction)

从施工准备开始到工程竣工,在时间安排上的总体计划。具体内容包括施工准备工程,各项建筑物施工,机电设备安装的进展,主体工程的主要工程量汇总,各期各项主要工程的施工强度,分年度的工程任务,投资及材料设备的供应计划,劳动力计划,大型机械设备调度及施工供风、供水、供电负荷计划等。

施工总进度是施工组织设计和施工管理工作中的重要文件,是指导施工,制定工程分年度生产计划的依据。合理的施工总进度是保证工程工期、质量、安全、经济、顺利达到施工日的有效手段。

施工总进度的表示形式 主要有横道图、斜线图与网络图三种。①横道图,又称甘特图(Gantt Chart),是按单项工程逐工序安排的,以纵坐标表示工程项目,横坐标表示工期,在横线上、下注明分期完成的工程量,施工强度,以及分阶段达到的工程形像面貌。其表达方式比较简单、直观,但各项工程之间的相互关系不够明确。表是以混凝土拱坝为例的施工总进度示意表,施工方案是以断流围堰配合隧洞导流,缆索式起重机施工,隧洞引水,岸边厂房布置,进度安排至第二台机组发电。②斜线图。表示方式与横道图相似,但是,它还利用斜线表示出分项工程之间的工序衔接,计划协调和主要机械设备调度,体现出平行流水和交

又作业的关系。斜线图一般多在单项工程或生产工艺流程中使用,对于错综复杂的施工总进度使用较困难。
③网络图。将工程施工全过程的各项活动,按项目之间与工序之间的有机联系与逻辑控制条件用节点和矢线组合成网络,然后通过电子计算机进行数学模型表达和数学方法定量处理,进行施工进度分析、优化。能在

错综复杂的施工环节中寻找出控制施工的关键工作,并选定关键路线。同时,还可在施工过程中,根据实践的反馈,及时对进度计划准确地作出调整和修正。所以它是一种科学的、先进的进度设计与施工管理方法,见图,图中序号之间的数字为完成该工序的月数,其工程举例同表。

水电站施工总进度示意表

项 目		工 程 量				工 期																
		单位	土石 开挖	混凝土 浇筑	其他	第 1 年				第 2 年				第 3 年				第 4 年				
						1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
准备工程																						
导流工程	隧 洞																					
	围 堰																					
	下闸蓄水																					
混凝土拱坝	坝基开挖																					
	混凝土浇筑																					
	接缝灌浆																					
引水工程																						
厂房工程	基础开挖																					
	混凝土浇筑																					
	机组安装																					

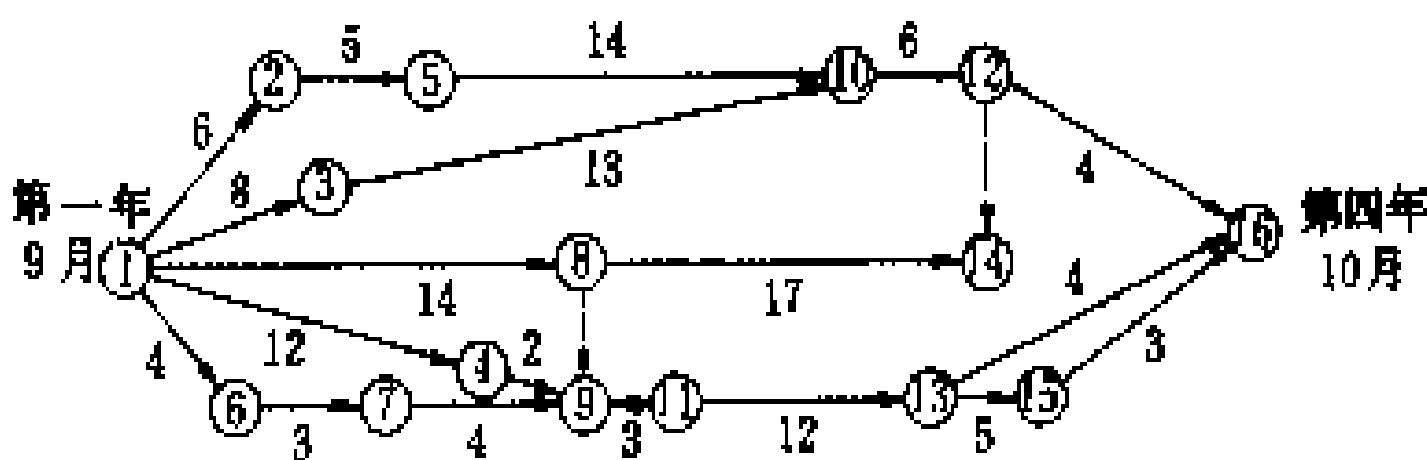
施工总进度的阶段划分 一般可划分为工程筹建期、工程准备期、主体工程施工期及工程完建期四个阶段。施工总进度的计算方法和各阶段的起始时间,世界各国没有统一的标准和明确的规定。中国 SDJ338-89《水利水电工程施工组织设计规范(试行)》规定,工程施工总工期一般由上述后三项时间组成。

(1)工程筹建期。为工程正式开工前由业主负责为承包单位进场创造条件的一段时间。主要工作包括对外交通、征地、施工供电、通信及招标、评标与签约等。由于这段时间是在承包单位正式进场之前,故可不列入施工总进度。

(2)工程准备期。为主体工程创造施工条件,包括场地平整、场内交通、供风、供水、供电系统、施工导流与修建各项施工用生产和生活设施等,直至主体工程正式开工前的时段。

(3)主体工程施工期。从水电站主体建筑物项目正式开工时起至第一台水轮发电机组发电为止的一段时

间。



水电站施工总进度网络图示意图 (单位: 月)
①→②厂房削坡; ②→⑤厂房开挖; ⑤→⑩厂房混凝土;
⑩→⑬第一台机组安装; ⑬→⑯第二台机组安装; ①→③引水隧洞开挖; ③→⑩引水隧洞混凝土; ①→④导流洞施工; ④→⑨围堰截流; ⑧及⑭分别为截流和第一台机组发电的时间控制节点; ①→⑥上坝公路开挖; ⑥→⑦缆机平台开挖; ⑦→⑨坝肩削坡; ⑨→⑪大坝基坑开挖; ⑪→⑬坝体混凝土; ⑬→⑮溢流闸门安装; ⑮→⑯坝体接缝灌浆; ⑯→⑰大坝尾工

(4)工程完建期。自第一台水轮发电机组投产后至工程竣工为止的一段时间。

水电站施工总进度的特点 水电站是一项规模庞大、施工复杂、且受水文、气象、地质等自然因素和社会因素影响，具有施工条件多变及施工时间性和施工间断性的工程。施工进度没有可资遵循的典型工程标准进度，也很难取得可直接应用的工期、劳动力和机械的工效指标。因此编制施工总进度的难度很高，可靠性受客观条件影响很大。①施工时间性的特点，如河道截流时段要选择枯水初期，以便截流后有较长的枯水期；蓄水一般希望选择在汛前，以争取拦蓄洪水早发电；为实现施工期间防洪渡汛所要求的各阶段工程形象面貌而必须根据水情及时调整工程施工工点、施工程序和施工强度；混凝土坝施工的坝体接缝灌浆需安排在寒冷季节，混凝土充分收缩，接缝张开度大的时候进行等等。②施工间断性的特点，如分期围堰导流方式，将整个工程分期分段施工，同时前期工程要为后期工程创造导流条件；在采用枯水期导流时（见断流围堰导流），汛期建筑物过水部分被迫停工，非过水部分虽仍可施工，但受到施工条件和工作面缩小等影响而要间断施工或降低施工强度。以上种种因素都会造成工程程序的变化，工序不连贯或工作面交替频繁，从而导致有效工日减少，施工强度不均衡，工期变化等。而对于综合性开发的水电站工程，在编制施工总进度时还要考虑到交通、航运、灌溉、防洪及下游供水等方面的要求。

编制施工总进度的原则 主要有：①遵守国家的政策、法令，参照当地政府规定的有关条例。②根据业主（建设单位）提供的工程建设条件和进度要求。③各期工程施工的形象面貌要满足相应防洪、蓄水、环境保护和移民、征地的要求。④要具体分析研究工程施工特性、施工条件（包括工程条件、自然条件和社会条件）进行技术经济的综合比较，选定合理工期。⑤运用网络等技术，确定施工关键路线并对主要进度指标、施工程序、分年度投资计划、物资与机械设备供应计划以及劳动力组织等进行全面优化，实现均衡施工。⑥设计采用的技术措施、定额及指标应符合有关的规程规范。⑦编制过程中要与交通、航运、灌溉、给水、放水等有关部门联系，避免干扰、克服矛盾。

（章景安）

shidu

湿度（humidity） 空气中的水汽含量或潮湿程度。常用水汽压、饱和差、绝对湿度、相对湿度、露点、比湿等物理量表示。

测量湿度的常用仪器有干、湿球温度表，通风干湿表，毛发湿度表（计）和湿度计等。

（1）水汽压（ e ）。空气中水汽部分的压力，空气中

水汽含量愈多，水汽压愈大。在一定温度下，空气中所能容纳的水汽分子的数量有一定限度，达到此限度时的空气称饱和空气，此时的水汽压称为饱和水汽压（ e_s ）。

（2）饱和差（ d ）。某一温度下饱和水汽压 e_s 与实际空气中水汽压之差， $d=e_s-e$ 。在研究水面蒸发时常用到饱和差。

（3）绝对湿度（ ρ_v ）。单位体积湿空气中含有的水汽量，又称水汽密度，单位为 g/m^3 。绝对湿度只能通过其它量间接推算。如水汽压 e 的单位取 mmHg，绝对湿度 ρ_v 的单位取 g/m^3 时，二者关系为

$$\rho_v = 289e/TK$$

式中 TK 为绝对温度。

（4）相对湿度（ u ）。空气中实际水汽压 e 与同温度下饱和水汽压 e_s 之比，用百分数表示。

（5）露点（ t_d ）。含有一定量水汽的空气，在气压不变的情况下降低温度，使空气达到饱和时的温度，称为露点温度，简称露点。

（6）比湿（ q ）。一团湿空气中，水汽的质量与该团空气的总质量的比值称为比湿。

$$q = \frac{m_v}{m_v + m_d}$$

式中 m_v 为水汽质量； m_d 为干空气质量。

（夏方佐）

Shisanling Choushui Xu' neng Dianzhan

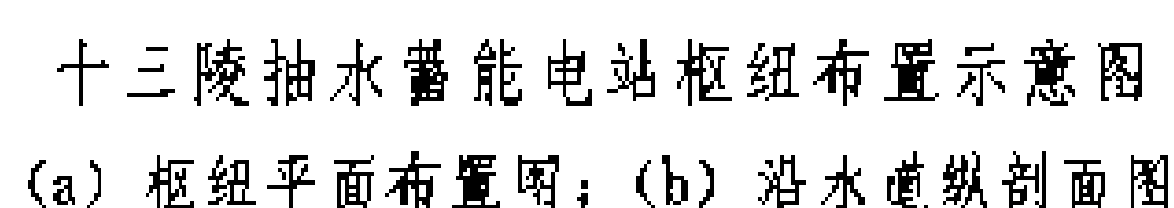
十三陵抽水蓄能电站（Shisanling Pumped Storage Power Station）

位于北京十三陵风景区，距昌平县城 4 km，距北京城区 40 km。电站装机发电容量 800 MW，年发电量 12 亿 kW·h；抽水容量 816 MW，年抽水用电量 16.5 亿 kW·h。以 2 回 220 kV 出线接入华北电力系统，为京津唐地区提供可靠的调峰、填谷和紧急事故备用电源，不仅可改善首都供电质量，还使电力系统每年节煤约 22.5 万 t。1993 年底土石方开挖填筑、地下系统开挖工作基本结束，衬砌以及钢管、机组安装工程开始。工程枢纽布置见图。

上水库和下水库 利用 1958 年建成的十三陵水库为下水库，在水库左岸蟒山山岭北侧的上寺沟建造上水库。上下水库间水平距离约 2120 m，最大水头 481 m。

在上寺沟填筑一座 75m 高的堆石坝，壅水形成上水库。正常蓄水位 566.0 m，库容 445 万 m^3 ，消落深度 35 m，调节库容 442 万 m^3 。水库周长 1595 m。库盘基岩为侏罗系安山岩，岩石风化破碎，透水性较强。为防止渗漏，库底和四周全部以钢筋混凝土面板衬砌，衬砌总面积约 17.6 万 m^2 。

利用已建十三陵水库做下水库。十三陵水库位于



引水隧道穿过的山体主要是安山岩和复成分砾岩,局部有侵入的正长斑岩和辉绿玢岩岩脉。引水隧道2条,直径5.2 m,采用60 cm厚钢筋混凝土衬砌,长437 m和438 m。引水调压井为双室阻抗式,设在引水隧洞尾部,竖井直径8 m,高87 m。高压管道2条,直

(沈义生 邱景安)

发电厂房 位于左岸,长 154.4 m,宽 23 m,高 46.6 m,上覆岩体厚 200 余 m。厂房底板高程比下水库最低水位低 64 m。厂房设有交通洞、出线洞和排风兼安全洞与外界相通。安装场设在厂房中部,两侧

石方开挖 (rock excavation) 将岩体破碎、清除或搬运至别处的施工过程。石方开挖一般都用凿岩设备钻孔,孔内装填炸药爆破,破碎后的石块用挖



掘机具装入运输设备运至指定地点。在开采少量条石和开挖松软岩体时,也可用风镐、撬、楔等工具施工。

石方开挖分明挖、洞挖和水下开挖三类。

(1) 石方明挖。露天岩体开挖。主要应用于建筑物地基、路基、渠道、溢洪道等工程开挖和石料开采。开挖方法是根据不同地形、地质和建筑物的要求而定。对保留区岩体的完整性有一定要求和建基面以上石方明挖,常用浅孔分层松动爆破。对保留区岩体完整性要求不严、建基面保护层以上的厚层岩体开挖和石料开采,常用深孔梯段爆破。对保留区岩体完整性和岩石块度要求不高,且开挖区至保护对象已有一定安全距离的石方明挖,可用经过专门设计的大量药包洞室爆破。明挖石方最常用的钻孔机具是以压缩空气为动力的各类风钻和液压凿岩机(见钻孔机械)。

(2) 石方洞挖。又称石方暗挖,是各种地下工程的岩体开挖。主要应用于各类隧洞、地下厂房、竖井、斜井等开挖工程。一般用凿岩机或凿岩台车钻孔,中心掏槽崩落,周边光面爆破或预裂爆破。在中等强度岩体中的直线长隧洞,也常用全断面掘进机开挖。

(3) 水下开挖。主要应用于清理航道礁石、扩挖码头船坞水位以下的岩体,隧洞进水口开挖,地下水位以下打井工程中的岩体开挖等。常用表面敷设防水药包、定位钻孔装药爆破和岩塞爆破等技术。

石方开挖爆破时,要防止爆震波即爆破所产生地震波对附近建筑物和设备的影响,人员要撤至个别飞石及爆破冲击波(爆破时由于炸药突然分解产生的空气冲击波及有害气体)的影响范围之外。水利水电工程石方开挖的石碴,明挖用推土机配挖掘机或装载机装自卸汽车运输;洞挖用推土机配挖掘机、装载机或装岩机装自卸汽车、矿车或带式输送机运输。超径石碴在现场解体以适应装碴设备斗容。

(王守道)

shilifa jingliu tiaojie

时历法径流调节 (runoff regulation by time series method) 按历史径流重演的假定,用实测(含插补)的径流系列,根据发电和综合利用的要求,进行径流调节的方法。主要用于制定水库运行决策,拟定水库的运行方式,并据此计算水电站的出力、调节流量、库水位、水头等过程和各项统计特性,以及相应的保证出力和年发电量等动能效益指标。

调节方式 调节方式分为3种:①等流量径流调节。在调节期内,各时段调节流量相等。主要用于要求均匀调节流量的水资源用户如供水等,也用于以发电为主时水库的粗略调节计算。②等出力径流调节。同一

调节期内,出力相等。适用于系统对水电站出力的要求在年内各时段变化不大或不明确的情况。③变出力径流调节。水电站在年内不同时段以不同出力满足电力系统的要求,进行调节,比较符合实际情况。

计算时段的划分 时历法径流调节是将整个计算期划分为若干个时段,逐时段进行调节计算的。计算时段的划分,从满足精度及节省计算工作量出发,调节期长的水库,计算时段可长些,短期调节的水库宜短些。对于具有季调节以上调节能力的水电站,计算期长度一般用月,有时在汛期用旬。周、日,无调节水电站宜取日。若上游有调节期长的水电站,其计算时段也可相应取长些。

计算依据及基本资料 ①电站的特征值(正常蓄水位、死水位、装机容量等)。②径流系列资料。③水库水位与容积、面积曲线,即库容曲线。④水库水量损失资料,含蒸发损失(与水库面积、气象条件有关)、渗漏损失(决定于水文地质条件和库水位)和结冰损失(在北方的冬季,溶冰后仍回归水库)。⑤综合利用从库内引水资料(引水时间、数量及高程)。⑥水电站泄流量(含发电流量和弃水流量)与尾水位关系曲线。⑦发电流量与水头损失关系曲线。⑧综合利用要求或限制。⑨水轮机运行特性资料。

基本公式 时历法径流调节的基本原理是水量平衡和能量转换,用公式表示为

$$V_{2i} = V_{1i} + (Q_{in} - Q_g - Q_{ev} - Q_{in}) \times \Delta T_i \quad (1)$$

$$P_i = K \times Q_g \times (Z_{in} - Z_{ti} - H_{ti}) \quad (2)$$

$$V_{1i} = V_{2i-1} \quad \text{当 } i > 1; \quad V_{11} = V_{2n} \quad (3)$$

式(1)为水量平衡方程,式(2)为能量计算公式,式(3)为连续方程。式中 n 为计算时段数; i 为时段序号, $i=1, 2, 3, \dots, n$; Q_{in} 、 Q_g 、 Q_{ev} 、 Q_{in} 分别为时段 i 入库流量、发电流量、弃水流量、综合利用库内引水及蒸发渗漏损失流量, m^3/s ; V_{1i} 、 V_{2i} 为时段 i 初、末的库容, m^3 ; ΔT_i 为时段 i 的秒数; P_i 为时段 i 平均出力, kW ; K 为出力系数(见水电站出力) $= 9.81 \times \eta_t \times \eta_g$; η_t 为水轮机效率; η_g 为发电机效率; Z_{in} 为时段 i 水库平均水位, m ; Z_{ti} 为时段 i 尾水位, m ; H_{ti} 为时段 i 水头损失(一般与发电流量的二次方成正比), m 。

式(2)右端括号内的数值为水电站工作水头。

约束条件 有以下几个方面。

(1) 库容约束

$$V_{1i} \leq V_{\max}$$

$$V_{1i} \geq V_{\min}$$

式中 V_{\max} 、 V_{\min} 分别为与正常蓄水位、死水位相应的库容。

(2) 出力约束

$$P_i \leq CAP$$



$$P_i \leq CAP + (H - H_d) \times DP$$
$$P_i \geq P_{min}$$

式中 CAP 为电站装机容量, kW; H 为水电站工作水头, m; H_d 为水电站设计水头, m; DP 为当水电站工作水头低于设计水头时, 每 1 米水头差值相应的预想出力差值; P_{min} 为要求水电站的最小出力, kW。

(3) 综合利用约束, 含: ①防洪对汛期库水位的约束; ②灌溉对灌溉期最小调节流量约束; ③航运对库水位及最小(或最大)调节流量约束; ④供水对最小调节流量约束; ⑤旅游、卫生对库水位约束等。

代表年及代表段的选择 时历法径流调节常用长系列径流资料进行计算, 但有时为了减少工作量, 可选择水文代表年或水文代表段(即代表年列), 进行计算。代表年或代表段的选择, 考虑下述原则。

(1) 计算年的划分应以水文年为准, 即每年的汛期初开始至次年的枯水期末结束。

(2) 年调节及以下的调节性能的水电站, 可选代表年, 但至少要包括丰、平、枯三种代表年, 而且枯水年的水量保证率应与设计保证率接近, 平水年的保证率应接近 50%, 丰水年与枯水年保证率之和, 应接近 100%。对于低水头水电站, 在选择代表年时, 应考虑由于汛期下游水位升高, 致使电站出力减少这一因素。

(3) 多年调节水电站, 要选系列代表段, 而且代表段的平均流量及年水量偏差系数, 应分别与长系列的年水量及偏差系数相接近, 代表段内应包括丰、平、枯三种代表年及连续枯水年系列。

(4) 对于水电站群的径流调节, 其代表段的选择, 以调节性能最好(即调节期最长)的电站为准。

计算方法 有数解法和图解法两种。数解法精度较高, 平工计算时常用列表法; 电算时, 常把一个时段的调节计算, 编成标准子程序, 以提高效率。图解法比较简便, 常用作求数解法的近似值, 以加快数解法的收敛。

数解法 利用径流调节计算表进行计算, 见表。

(1) 等流量调节。在调节期(调节期可在水量差积曲线上求得)内的供水段及蓄水段按各自的等流量进行调节, 即在满足各种约束条件的前提下, 分别使各供水段及蓄水段的最小调节流量(发电流量)极大化。

(2) 等出力调节。在满足各种约束条件的前提下, 分别使各供水段和蓄水段的最小出力极大化。计算步骤为: ①先用水量差积曲线估计调节段, 并根据粗算, 假定蓄水段及供水段的等出力值。②根据假定的等出力值, 进行一个时段的调节计算, 即先假定发电流量, 按上表进行水量平衡及能量计算, 求与假定的发电流量相应的出力值, 并与假定的等出力比较, 若充分接

近, 则一个时段的计算结束; 否则重新假定发电流量, 再进行该时段的调节计算。③当供水段或蓄水段计算完毕, 必须检验库容是否放空(供水段)或是否蓄满(蓄水段), 并检验原先假定的等出力值是否合适, 若达到上述要求, 则本段计算结束; 否则, 重新假定等出力值, 回到供水段或蓄水段初, 重算。为了加快收敛, 可先用等流量调节法, 计算出供水段和蓄水段各时段的出力值, 并分别求供水段和蓄水段的平均出力, 作为等出力的近似值。

径流调节计算表

时段 i	(1)	
入库流量 Q_n (m ³ /s)	(2)	
上游引水和水损 Q_r (m ³ /s)	(3)	
发电流量 Q_g (m ³ /s)	(4)	
弃水流量 Q_w (m ³ /s)	(5)	
时段末水库容积 V_2 (m ³)	(6)	
时段平均库水位 Z_w (m)	(7)	
尾水位 Z_t (m)	(8)	
水头损失 H_f (m)	(9)	
净水头 H (m)	(10)	
出力 P (kW)	(11)	

- 注: 1. 第 (1) 项时段, 以月、旬或日的秒数表示, s。
2. 第 (5) 项 $Q_w = (Q_n - Q_r - Q_g)$ 。
3. 第 (6) 项 V_2 按公式 (1) 计算。
4. 第 (7) 项 Z_w 按时段平均库容 $[(V_2 + V_1) / 2]$, 查库容曲线而得。
5. 第 (8) 项 Z_t 以 $Q_n + Q_g$ 之值查泄流量与尾水位关系曲线而得。
6. 第 (9) 项 H_f 以 Q_g 查水头损失曲线而得。
7. 第 (10) 项 $H = (Z_w - Z_t - H_f)$ 。
8. 第 (11) 项出力 P_i 按公式 (2) 计算。

(3) 变出力径流调节。在满足各种约束条件的前提下, 使水电站对电力系统的效益极大化。计算步骤与等出力径流调节基本相同。不同点在于, 变出力是按电站的能量, 进行电力系统的电力电量平衡, 求得一年内各时段本电站应发的出力, 再逐时段按应发的出力, 进行径流调节; 由于要进行迭代收敛, 故电力电量平衡和径流调节是交互进行的。

图解法 需先制作辅助曲线。等流量径流调节使用流量差积曲线, 等出力和变出力径流调节使用的是等出力线。

(1) 流量差积曲线和等流量径流调节的作图。流量差积曲线见图 1。

流量差积曲线是单位时段的流量与整个计算系列流量均值之差的累计值同时间的关系曲线, 可以下式

表示

$$Y_t = \sum_{t=t_b}^{t_e} (Q_t - Q_0) \Delta t$$

式中 Y_t 为 t 时段的差积水量，即流量差值的累计值， m^3 ； Q_t 为 t 时段的流量， m^3/s ； Q_0 为整个计算系列流量的均值， m^3/s ； Δt 为时段长； t_b 、 t_e 为起始和终止时段的序号。

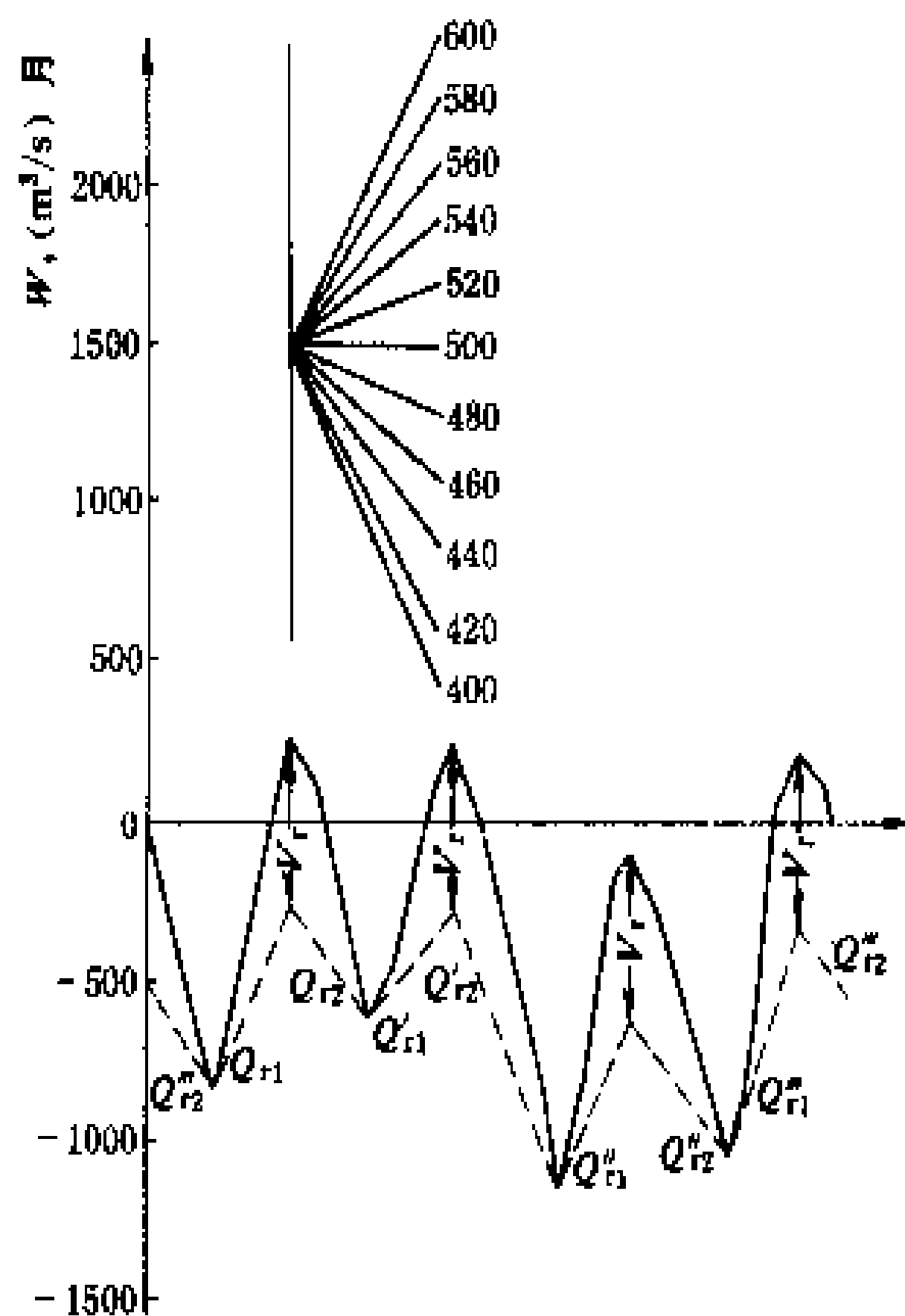


图1 用差积曲线进行等流量径流调节示意图

流量差积曲线以纵坐标表示差积水量，横坐标表示时间，并以一组放射线为比例尺，其中水平放射线代表平均流量。差积曲线以其线段的斜率代表该时刻的流量值，若线段斜率为正值（即线段与水平线的交角为仰角时），则该时刻的流量大于平均流量，仰角越大，比平均流量大得越多；若线段斜率为负值（即交角为俯角），则小于平均流量，俯角越大，水量越枯。可根据水库的调节库容，用直尺在差积曲线上画出调节流量，进行等流量径流调节。图1为按流量差积曲线进行等流量径流调节的示意图，图中的实线为流量差积曲线，虚线为等流量的调节线。在某一时段，当流量差积曲线的斜率大于调节线的斜率时，表明水库进行蓄水；小于调节线的斜率时，为水库供水阶段。若径流调节从库空开始，当某一时刻，流量差积曲线的纵坐标与相应调节线纵坐标的差值等于（不能大于）水库调节容积时，表示水库调节库容蓄满，当两者的纵坐标相等时，表示水库调节库容放空。图1中， Q_{r1} 、 Q'_{r1} 、 Q''_{r1} 、 Q'''_{r1} 和 Q_{r2} 、 Q'_{r2} 、 Q''_{r2} 、 Q'''_{r2} 为不同时期与蓄水和放水过程相应的等调节流量， V_t 为调节库容。

在流量差积曲线的基础上可以做出力差积曲线，

出力差积曲线与流量差积曲线相似，所不同的是其变量为与时段水量相应的出力，各时段的出力为流量乘以平均水头和出力系数，其图形与流量差积曲线极为相似，故可用流量差积曲线的纵坐标乘以相应的比例系数而得。出力差积曲线，可用作等出力径流调节，但由于各时段出力均按平均水头计算，故与实际水头可能相差较大，从而带来较大的误差，故一般只作为粗略计算之用。

(2)等出力线和等出力径流调节的作图。等出力线是以出力为参数的库容与发电流量关系曲线，见图2。图中横坐标为调节流量， m^3/s 。纵坐标为库容， (m^3/s) 月（262.8万 m^3 ）。右方曲线族代表等出力线，每根线上的各点均为同一出力。图中的斜线的斜率代表调节时段的时间，以月计。正斜线用于蓄水时，负斜线用于供水时。在确定这些斜线的斜率时，因为一个调节时段中，水库水位不断变化，须用平均水位计算出力，故其横轴的比例尺为纵坐标比例尺的二倍。图中右边带阴影的线，为机组出力受阻（限制）线。

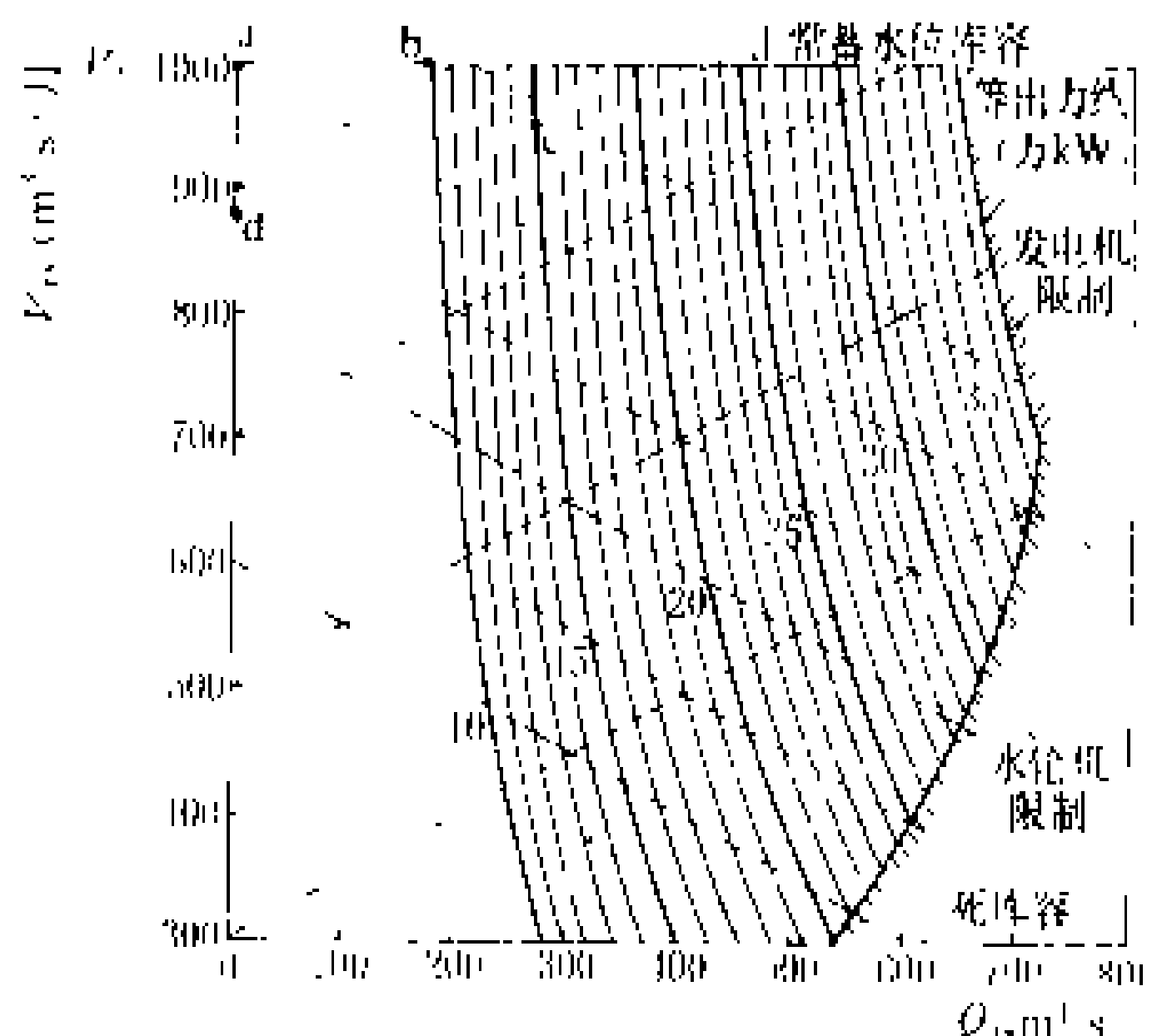


图2 等出力径流调节作图示意

设调节周期为当年的11月初至次年4月底，11月初水库为满库，库容为 V_1 （图中a点）。从 V_1 开始，本月入库流量 $150 m^3/s$ ，得b点，今假定各时段发出力15万kW，由b点平行负斜线推平行线交于15万kW的出力线于c点，得调节流量 $270 m^3/s$ ，则月末库容（即12月初始库容）为 $1000 + 150 - 270 = 880 (m^3/s)$ 月（d点）；再从d点开始根据入库流量求出力15万kW的调节流量，得12月末库容。如此类推直到次年4月底。要使调节周期末的库容为死库容，否则，调整 P 值，重复计算。以上为放水过程。如在蓄水过程，作图法相同，只不过蓄水斜线为仰角，绝对值相同。

(3)变出力径流调节的作图，基本相同，但每月的出力按系统需要。

（许自达）



shixyan yingli fenxi

实验应力分析 (experimental stress analysis)

用实验手段研究或求解受载物体的变形或应力状态的学科,是实验力学的一个分支。其特点是能比较真实地求得构件的强度和刚度等有关参量。实验应力分析方法于17世纪为解决实际问题而提出,随着工业和科学技术的发展而不断发展。其用途为:认识各参量间依赖的客观规律或验证它们的正确性;为产品或工程的设计、验收或运行提供合理的参量,评价其安全储备等情况,并作为关键部件监视和控制其强度的手段;当机器或工程结构发生破坏事故时作为失效分析的手段。利用物体变形时的几何变化及同时引起的感受材料的机械、电学、磁学、光学、声学、热学等物理效应,进行应力或变形的量测,从而形成机械式测试法(机测法)、电测法、光测法、声测法、热测法等实验方法。其它还有脆性涂层法、网格法等。近年来自动控制和图象处理技术广泛应用,实验数据的采集和处理的自动化有很大发展,使实验周期缩短,精度提高。

机械式测试法 用杠杆式引伸计、千分表等机械式仪表进行测试。

电测法 有电阻式、电容式和电感式应变计测试技术,其中以电阻式应用最广泛。电阻式应变计是用高电阻率感受材料(金属丝、合金箔、半导体等)粘结在绝缘基底上而制成的电阻元件,将它粘贴或焊接在构件被测表面,构件变形时,应变计感受部的电阻值 R 也随之变化,有增量 ΔR ,则在弹性范围有 $\Delta R/R = K\epsilon$,式中 K 是应变计的灵敏系数, ϵ 是应变计标距内的平均应变。 $\Delta R/R$ 由电桥电路通过电阻应变仪测得。可分别得出各种内力产生的应变分量,并能补偿温度变化的影响。用多个应变计组成的应变花可求得测点的主应变方向及其两个主应变值。该方法可测物体的静态、动态(频响达100 kHz)和温度范围为 $-100 \sim 400^\circ\text{C}$ 的应变,测量误差可达 $\pm 1\% \sim 2\%$,灵敏度可达 $1 \mu\epsilon$,且便于采用遥测技术。

光测法 一种非接触性测量技术,按原理可分为光弹性、光学干涉及X射线等3类。

(1) 光弹性法。有透射式光弹性、反射式光弹性(光弹性贴片法)、全息光弹性、光塑性等方法。它依据某些透明材料在变形时具有暂时双折射效应的特性,可测得模型中垂直入射光平面的主应变差或主应力差及它们的主方向,并借助其他方法可分离主应力。全息光弹法还可测得主应力和的信息,并直接分离主应力。另外,利用光弹性冻结切片法或夹片法,或散光法可求得三维光弹性模型内部的三维应力状态和主方向;动光弹性法可测动态应力以及物体内部传播的应力波;

热光弹性法可测热载荷下的热应力;光塑性法可测弹塑性范围或塑性范围内的变形和应力。这类试验周期长,精度稍差,但直观、逼真、可靠,在理论和技术上都比较成熟,在工程中应用极广。

(2) 光学干涉法。有全息法、云纹法、散斑法等。这类方法主要利用物体变形或位移使光栅或狭缝的空间频率变化引起的衍射效应,通过现代光学处理提取信噪比很低的有用数据,测得物体表面的三维位移和应变,其中云纹法还可测大变形和塑性变形。这些方法灵敏度很高,为毫微米量级,可记录和再现变形完整的信息。自有激光光源以来,这类方法发展很快,为工程中某些复杂而特殊问题的解决提供了有力的实验手段。

(3) X射线法。可测金属表层的残余应力和缺陷。**声测法** 有声弹性法、声发射法和声全息法。它们在测量焊接区的残余应力、裂纹扩张和探测构件内部缺陷等方面都有特殊效能。

热测法 有热弹性法,是20世纪80年代前后才兴起的一种方法,利用红外线技术对变形的热弹性效应进行非接触式测试,以彩色分级显示,灵敏度为 0.001°C 。它已在焊缝和复合材料受交变载荷的动态变形等方面的测试中应用。

比拟法 有电比拟法、薄膜比拟法、沙堆法等。对两种不同的物理过程,利用其具有相似的数学模型的特性,按相似法则由其中一种实验结果求得另一种物理过程的变化规律和数据。例如电场强度和体力为零(或常量)的主应力和函数都满足拉普拉斯方程,只要它们边界条件互相对应,则通过域内的电位差测量就可以求得各相应点的主应力和值。薄膜比拟法可求得复杂截面扭转的剪应力分布。这类实验方法简便,但精度不高。

参考书目

Kobayashi A. S. ed. Handbook on Experimental Mechanics. Prentice-Hall Inc. 1987

(潘少川)

Shijie da shuidianzhan

世界大水电站 (large hydropower stations in the world)

世界上已建成或正在建设的、装机容量在2000MW及以上的水电站,至1991年底共有53座。拉丁美洲17座,北美洲15座,亚洲(包括苏联的亚洲部分)15座,欧洲4座,非洲2座。其中装机容量2000~4000 MW的39座,4001~10000 MW的12座,10000 MW以上的2座。最大的是巴西和巴拉圭在巴拉那河边界河段上合建的伊泰普水电站(Itaipu Hydropower Station),装机容量12600 MW。各水电站主要特性见表。

世界装机容量 2000MW 以上大水电站指标表

序号	水电站	所在国家	所在河流	坝址年径流量(亿 m ³)	主坝坝型	最大坝高(m)	总库容/调节库容(亿 m ³)	库容系数 β_1/β_2	现有/设计装机容量(MW)	开始发电年份
1	伊泰普 Itaipu	巴西 巴拉圭	巴拉那河	2860	支墩坝	196	290 /190	0.07 /0.44	12600/12600	1984
2	大古力 Grand Coulee	美国	哥伦比亚河	963	重力坝	168	118 /64.5	0.07/0.47	6494/9104	1941
3	古里 Guri	委内瑞拉	卡罗尼河	1537	重力坝	162	1350/854	0.56	(9100/9100) (10300/10300)	1968
4	图库鲁伊 Tucuruí	巴西	托坎廷斯河	3470	堆石坝	98	458 /254	0.07	4000/7960	1984
5	拉格朗德二级* La Grande 2	加拿大	拉格朗德河	922	堆石坝	168	617 /194	0.21/1.01	5328/7326	1979
6	萨扬-舒申斯克 Саяно-Шушенская	苏联	叶尼塞河	467	重力拱坝	245	313 /153	0.33	6400/6400	1978
7	克拉斯诺雅尔斯克 Красноярская	苏联	叶尼塞河	884	重力坝	124	733 /304	0.34/0.52	6000/6000	1967
8	丘吉尔瀑布* Churchill Falls	加拿大	哈密尔顿河	439	土坝	32	334 /283	0.64	5428/5428	1971
9	兴古* Xingo	巴西	圣弗兰西斯科河	909	堆石坝	140	38 /	0.02/0.51	/5000	在建
10	布拉茨克 Братская	苏联	安加拉河	917	重力坝	125	1690/482	0.53/1.03	4500/5000	1961
11	乌斯特-伊里姆 Усть-Илимская	苏联	安加拉河	1016	重力坝	105	594 /28	0.03/0.97	3840/4320	1974
12	卡博拉巴萨* Cabora Bassa	莫桑比克	赞比西河	868	拱坝	171	630 /518	0.60/1.16	2075/4150	1975
13	雅西雷塔 Yacyretá	阿根廷 巴拉圭	巴拉那河	3750	土坝	42	210 /19	0.00/0.34	/4140	在建
14	鲍古昌 Богучанская	苏联	安加拉河	1073	重力坝	87	582 /23	0.02/0.85	/4000	在建
15	保罗阿丰索* Paulo Afonso	巴西	圣弗兰西斯科河	858	堆石坝	35	1.44/1.28	0.00/0.52	3986/3986	1955
16	罗贡* Рогунская	苏联	瓦赫什河	194	堆石坝	335	133 /86	0.44	/3600	在建
17	塔贝拉 Tarbela	巴基斯坦	印度河	827	堆石坝	143	137 /115	0.14	1750/3510	1976
18	二滩* Ertan	中国	雅鲁江	527	拱坝	240	58 /33.7	0.06	/3300	在建
19	伊拉索耳台拉 Ilha Solteira	巴西	巴拉那河	1640	重力坝	90	212 /129	0.08/0.47	3230/3230	1973
20	马卡瓜 Macagua	委内瑞拉	卡罗尼河	1670	土坝	80	3.63/ —	0.00/0.51	387 /2967	1959



续表

序 号	水 电 站	所 在 国 家	所 在 河 流	坝 址 年径流量 (亿 m ³)	主 坝 坝 型	最大 坝高 (m)	总库容/ 调节库容 (亿 m ³)	库容系数 β_1/β_2	现有/设计 装机容量 (MW)	开始 发电 年份
21	雷维尔斯托克 Revelstoke	加拿大	哥伦比亚河	258	重力坝	175	51.8/14.0	0.05/0.63	1840/2760	1984
22	葛洲坝 Gezhouba	中 国	长 江	4510	重力坝	47	15.8/ —	0.00/0.01	2715/2715	1981
23	约翰代 John Day	美 国	哥伦比亚河	1541	重力坝	71	32.6/1.9	0.00/0.34	2160/2700	1968
24	察列克 Цурекская	苏 联	瓦赫什河	204	土 坝	300	105 /45	0.22/0.64	2700/2700	1972
25	圣西毛 Sao Simao	巴 西	帕腊奈巴河	702	堆石坝	127	127 /88	0.13/0.50	1608/2680	1978
26	拉格朗德四级 La Grande 4	加拿大	拉格朗德河	372	堆石坝	128	194 /71	0.19/1.23	2650/2650	1984
27	尼亚加拉 Niagara	美 国	尼亚加拉河	1812	无 坝				2190/2640	1961
28	麦 卡· Mica	加拿大	哥伦比亚河	183	堆石坝	242	247 /148	0.81	1736/2604	1976
29	伏尔加格勒 Волгоград	苏 联	伏尔加河	2520	土 坝	47	315 /86.5	0.03/0.36	2563/2563	1958
30	亚当贝克 Sir Adam Beck	加拿大	尼亚加拉河	1812	无 坝				2002/2552	1954
31	丹尼尔约翰逊 Daniel Johnson (马尼克五级, Manic 5)	加拿大	马尼夸根河	214	连拱坝	214	1419/357	1.67	2372/2542	1970
32	塞格雷多 Segredo	巴 西	伊瓜苏河	220	堆石坝	150	30 /20	0.09/0.32	/2520	在建
33	阿利亚河口 Foz do Areia	巴 西	伊瓜苏河	172	堆石坝	160	60.7/50	0.29	1674/2511	1980
34	伊塔帕里卡 Itaparica	巴 西	圣弗兰西 斯科河	884	堆石坝	105	108 /37	0.04/0.50	1500/2500	1967
35	契夫约瑟夫 Chief Joseph	美 国	哥伦比亚河	965	重力坝	73	6.4 /2.3	0.00/0.47	2457/2457	1955
36	戈登施勒姆· Gordon M. Shrum	加拿大	皮斯河	340	堆石坝	183	703 /370	1.09	2416/2416	1968
37	奇科森· Chicoasen	墨西哥	格里哈尔 瓦河	119	堆石坝	261	16.1/2.8	0.02/0.74	2400/2400	1980
38	阿塔图尔克 Ataturk	土耳其	幼发拉底河	262	堆石坝	184	487/193	0.74/1.57	300/2400	1991
39	广 州·· Guangzhou	中 国	召大水		堆石坝	68	0.17/0.14		1200/2400	1993

序号	水电站	所在国家	所在河流	坝址年径流量 (亿 m ³)	主坝坝型	最大坝高 (m)	总库容/ 调节库容 (亿 m ³)	库容系数 β_1/β_2	现有/设计 装机容量 (MW)	开始发电年份
40	拉格朗德三级 La Grande 3	加拿大	拉格朗德河	521	堆石坝	93	600 /252	0.48/1.36	2304/2304	1982
41	伏尔加列宁 Волжская Им. В. И. Ленина	苏联	伏尔加河	2400	土坝	45	580 /346	0.14/0.33	2300/2300	1955
42	德聂斯特罗夫** Днестров	苏联	德聂斯特河		重力坝		0.71/0.61		/2268	在建
43	胡佛 Hoover	美国	哥伦比亚河	160	重力拱坝	221	348 /196	1.22/3.10	1455/2159	1936
44	铁门 Djerdap	南斯拉夫 罗马尼亚	多瑙河	1710	重力坝	61	25.5/	0.00/0.01	2100/2100	1970
45	阿斯旺高坝 Aswan high dam	埃及	尼罗河	909	堆石坝	111	1620/900	0.99	2100/2100	1967
46	鹰石* Piedra del Aguila	阿根廷	利迈河		重力坝	163	113 /		/2100	在建
47	巴斯康蒂** Bath County	美国	小巴克溪		堆石坝	143	0.44/0.28		2100/2100	1985
48	伊图比阿腊 Itumbiara	巴西	帕腊奈巴河	432	土坝	106	170 /136	0.31/0.61	2080/2080	1980
49	萨尔托圣地亚哥 Salto Santiago	巴西	伊瓜苏河	265	堆石坝	80	67.5/41	0.15/0.42	1330/2000	1980
50	布烈依* Бурейская	苏联	布烈亚河	284	重力坝	139	209 /115	0.40	/2000	在建
51	李家峡* Lijiaxia	中国	黄河	209	拱坝	175	16.5/0.6	0.00/0.93	/2000	在建
52	特里* Tehri	印度	巴吉拉蒂河		堆石坝	261	35.4/26.2		/2000	在建
53	大岛 Ilka Grande	巴西	巴拉那河	2840	重力坝	38	300 /100	0.04/0.38	/2000	在建

注：1. 现有装机容量指 1991 年底达到数。
2. 库容系数 β_1 ＝本水库调节库容/坝址年径流量。
 β_2 ＝本库及其上游干支流已建大水库合计调节库容/坝址年径流量。
* 为地下厂房。
** 为抽水蓄能电站。

在电力系统中的地位 大型水电站利用的是再生水能资源,可替代大量煤炭和石油等燃料。伊泰普水电站,年发电量 710 亿 kW·h,每年可减少进口原煤 3400 万 t。委内瑞拉的古里水电站(Guri hydropower station),年发电量 510 亿 kW·h,每年可节省石油 1200 万 t。这些大型水电站,对所在国家的经济发展作用很大,而且减少了火电厂排烟、排硫、排热、排灰等对环境的严重污染。

这些大型水电站,都是所在国家或地区电力系统中的骨干电站。它们不仅提供大量电量,而且在电力系统中担负调峰、调频和事故备用任务,提高电力系统供电的可靠性和安全性。美国西北部哥伦比亚河上大古力水电站(Grand Coulee hydropower station)及其下游的梯级水电站,除担负邦纳维尔电力系统基荷和峰荷外,还向加利福尼亚州以火电为主的电力系统输送调峰电力。抽水蓄能电站则是专为调峰建设的,当今世



世界上最大的巴斯康蒂抽水蓄能电站 (Bath County pumped storage station) 装机容量 2100 MW。在建最大的中国广州抽水蓄能电站, 装机容量 2400 MW, 第一期 1200 MW, 于 1993 年开始发电。

水库及其综合利用 53 座水电站中, 总库容大于 100 亿 m^3 的水库 33 座, 其中大于 1000 亿 m^3 的 4 座。最大的是苏联布拉茨克水电站 (Братская ГЭС), 总库容 1690 亿 m^3 。

53 座水电站中, 多数水库对天然河流的洪枯径流调节性能较好。各水电站的调节库容与坝址平均年径流量相比的库容系数 β_1 , 以及加入其上游干支流已建水库调节库容的联合运行库容系数 β_2 均列于表中。 β_1 或 β_2 大于 0.30 的有 41 座, 其中等于或大于 0.50 的有 26 座, 均可进行年调节或多年调节。这些水电站对所在电力系统的安全经济运行起重要作用。

53 座水电站中, 多数除发电外还有灌溉、防洪、航运、供水、养殖、旅游等综合利用效益。美国的大古力水电站, 可由水库提水灌溉干旱高原, 规划面积 44 万 ha, 现已灌溉 22 万 ha。它与哥伦比亚河干支流其它水库相配合, 可使历史最大洪水的洪峰流量由 35000 m^3/s 削减至 22600 m^3/s , 达到下游河道堤防的安全泄量。径流经水库调节后可满足下游的航运和供水需求。

科罗拉多河上的胡佛 (Hoover) 水电站, 总库容 348 亿 m^3 , 有防洪库容 117 亿 m^3 , 可使最大洪水的洪峰流量由 8500 m^3/s 降至 2100 m^3/s , 解除该河下游的洪水灾害。另有调节库容 196 亿 m^3 , 可进行多年调节, 为下游发展农田灌溉 32 万 ha, 并向加利福尼亚州洛杉矶及其附近地区每年供水 15 亿 m^3 , 以及为发电进行调节。本水库及其上游格兰峡 (Glen Canyon) 等大型水库可长期拦截该河年输沙量 1.8 亿 t。库区上游 100 余 km, 可发展航运和旅游。

苏联伏尔加河上的大型水电站都设有双线船闸, 梯级水库衔接, 成为重要的内河通航水道, 全长 2629 km。通过伏尔加-莫斯科运河和伏尔加-顿河运河, 可上通莫斯科, 下通里海和黑海。水库提高水位和供应廉价电力, 为伏尔加河与乌拉尔河之间的地区发展提水灌溉提供了有利条件, 还可向沿河城市供水、发展渔业和旅游业。

埃及阿斯旺 (Aswan) 高坝水库对尼罗河径流进行多年调节, 为埃及和苏丹增加灌溉用水 220 亿 m^3 。埃及将原来引洪漫灌的 30 万 ha 农田改为常年灌溉, 并扩大灌溉面积 50 万 ha, 提高农作物产量 25%。上游苏丹境内也可扩大灌溉耕地 3 倍。此外, 水库拦洪解除了下游洪灾, 增加下游枯水期水深以利航运; 库区养鱼, 年增产 3 万余 t。水电站水库对生态环境也有一些不利影响, 如减少了引洪漫灌的淤肥, 使沿海沙丁鱼产量下

降, 河岸下切和海岸线退缩等。

这些水电站多数建于边远地区, 水库淹没和移民一般较少。移民较多的有: 伏尔加列宁水电站, 总库容 580 亿 m^3 , 迁移 35500 户; 阿斯旺高坝, 总库容 1620 亿 m^3 , 迁移 10 万人。水库淹没森林较多的例如巴西的图库鲁伊水电站 (Tucuruí hydropower station), 总库容 458 亿 m^3 , 淹没大片热带雨林, 木材量达 8000 万 m^3 。

坝 53 座水电站中, 坝高在 100m 以上的 33 座, 其中 200m 以上的 9 座, 最高的是苏联努列克 (Нурекская) 土坝, 高 300m。

53 座水电站中, 土石坝 28 座, 重力坝 16 座, 双曲拱坝 3 座, 重力拱坝 2 座, 连拱坝和支墩坝各 1 座, 无坝引水 2 座。土石坝填筑量在 4000 万 m^3 以上的有 12 座, 最大的是巴基斯坦的塔贝拉 (Tarbela) 土石坝, 达 10592 万 m^3 。巴西的阿利亚河口 (Foz do Areia) 和塞格雷多 (Segredo) 水电站, 采用混凝土面板堆石坝, 最大坝高分别为 160 m 和 145 m。

各种结构的混凝土坝 23 座, 最高的是苏联的萨扬-舒申斯克水电站 (Саяно-Шушенская ГЭС) 的重力拱坝, 最大坝高 245 m, 其次是中国的二滩水电站的双曲拱坝, 最大坝高 240m; 再其次是加拿大的丹尼尔约翰逊 (Daniel Johnson) (马尼克五级, Manic 5) 水电站的连拱坝, 最大坝高 214m。混凝土工程量在 100 万 m^3 以上的有 12 座, 最大的是伊泰普水电站, 1180 万 m^3 。

发电厂房 53 座水电站中, 有 37 座发电厂房设在地面。其中坝后式 20 座、河床式 6 座、岸边式 11 座。最大的坝后式厂房是伊泰普水电站的厂房, 长 968 m, 宽 99 m (包括副厂房), 高 112 m, 安装 18 台单机容量 700 MW 的混流式水轮发电机组, 设有两个安装间和两个控制室。有些水电站采用露天厂房, 如美国的尼亚加拉 (Niagara), 巴西的阿利亚河口等水电站。低水头电站常采用河床式厂房, 如中国的葛洲坝水电站、美国的约翰代 (John Day) 水电站、苏联的伏尔加格勒水电站和伏尔加列宁水电站等。

53 座水电站中, 有 16 座水电站的发电厂房设在地下。最大的是拉格朗德二级水电站 (La Grande 2 hydropower station) 的地下式厂房。其已建的地下式厂房长 483 m, 宽 26.5 m, 高 47.3 m, 安装 16 台单机容量为 333 MW 的混流式水轮发电机组。

水轮发电机组 53 座水电站中, 采用混流式水轮机的有 43 座。额定单机容量最大的为 700MW, 大古力水电站第三厂和伊泰普水电站都安装了这样大的机组。转轮直径最大的水轮机是大古力水电站的水轮机, 为 9.9 米。使用水头最大的水轮机是加拿大丘吉尔瀑布水电站 (Churchill Falls hydropower station) 的水轮

机,最大水头为 322 m,单机容量为 475 MW。

采用轴流转桨式机组的有 7 座,单机容量最大的是南斯拉夫和罗马尼亚合建的铁门 (Djerdap) 水电站的机组,单机容量为 175 MW。转桨式水轮机转轮直径最大的是葛洲坝水电站,单机容量 170 MW,转轮直径 11.3 m。

采用可逆式机组的 3 座。巴斯康蒂抽水蓄能电站,额定水头 329 m 时出力 350 MW,最大水头 390 m 时出力可达 508 MW,是当前最大的抽水蓄能机组。德聂斯特罗夫抽水蓄能电站,额定水头 135.2 m,单机出力 324 MW。广州抽水蓄能电站,额定水头 500.6 m,单机容量 300 MW。

超高压远距离输电 53 座水电站中,输电距离在 500 km 以上的有 31 座,其中 1000 km 以上的 17 座。大都采用 500 kV 超高压交流输电,有些采用 735 kV 及以上的特高压交流或直流输电。加拿大拉格朗德河梯级电站和丘吉尔瀑布水电站,输电距离 1100~1300 km,采用 735 kV 交流输电。委内瑞拉的古里水电站送电至首都加拉加斯,距离 600 km,采用 800 kV 交流输电。美国哥伦比亚河梯级水电站至洛杉矶的太平洋联络线长 1362 km,采用 500 kV 交流和 ± 400 kV 直流平行输电。莫桑比克的卡博拉巴萨水电站 (Cabora Bassa hydropower station) 至南非距离 1414 km,采用 ± 553 kV 直流输电。伊泰普水电站送电给巴西圣保罗,距离 850 km,采用 750 kV 交流和 ± 600 kV 直流平行输电。中国葛洲坝水电站送电给上海和华东地区,距离 1100 km,采用 ± 500 kV 直流输电。

分期建设和扩建 53 座水电站中,有 25 座在规划设计中考虑了分期建设。委内瑞拉的古里 (Guri) 水电站,初期坝高 110 m,设计中在大坝和坝后厂房之间预留位置,后期大坝加高至 162 m,装机容量由 2660 MW 增加到 9100 MW。巴西的图库鲁伊水电站,初期装机容量 4000 MW,预留第二厂房的位置,总装机容量可达 7960 MW。莫桑比克的卡博拉巴萨水电站,初期先建右岸地下厂房,装机 2075 MW,后期再建左岸地下厂房,使总装机容量达 4150 MW。阿根廷与巴拉圭合建的雅西雷塔水电站 (Yacyreta hydropower station),初期装机 2700 MW,最终可达 4050 MW。

53 座水电站中,有 7 座原设计未考虑分期建设,建成后一段时间,发现情况变化,再进行扩建。其原因,或因电力系统负荷增加,电站由原来主要担负基荷改为担负峰荷;或因上游梯级水库的建设,使库容调节系数增加,提高了电站的保证出力。美国大古力水电站原建装机容量为 1974 MW,后由美国和加拿大达成协议,加拿大在上游兴建了 3 座大水库,美国也在支流上建了几座大水库,使库容系数由 $\beta_1=0.07$ 增加到 $\beta_2=$

0.47,同时供电范围扩大,由主要担负基荷变为担负峰荷,装机容量现已扩建至 6494 MW,还准备扩建至 9140 MW。加拿大的拉格朗德二级水电站,原来装机容量 5328 MW,现正扩建为 7326 MW。

(陆钦侃)

shiliu

势流 (potential flow) 流场中流体微团不发生旋转且有势的流动形态,亦称无涡(无旋)流动。势流的速度可用速度势函数 φ 的梯度来表示,如

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad (1)$$

流场中存在势函数的流动,数学处理方法上称有势流动。势流中流体固有的粘性不起作用,所以理论上势流没有能量损失。势流是将实际流动理想化的一种模型,当流体粘性对流动的作用甚微或者可以忽略时,常把实际液体的流动当作势流处理(如溢流坝面或进水口的流场,除边界层部分外,可视为势流区),不仅在数学处理上有了重大简化,而且所得结果可相当准确地解释和解决许多具体的流动问题。

对势流的阐述和应用,通常限于恒定平面(二维)问题。以无涡为条件的平面势流场同时存在着速度势函数 $\varphi(x, y)$ 及与其正交的流函数 $\psi(x, y)$,二者都满足拉普拉斯 (Laplace) 方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

因此,平面势流分析取 φ 或 ψ 为流场未知函数来替代通常采用的流场速度 u 或 v ,使物理问题转化为在特定边界条件下解拉普拉斯方程的数学问题。近年来势流计算广泛应用电子计算机求其数值解。

势流场中势函数 φ 和流函数 ψ 的正交性,适合数学中的柯西-黎曼 (Cauchy-Reimann) 条件,从而还可利用复势

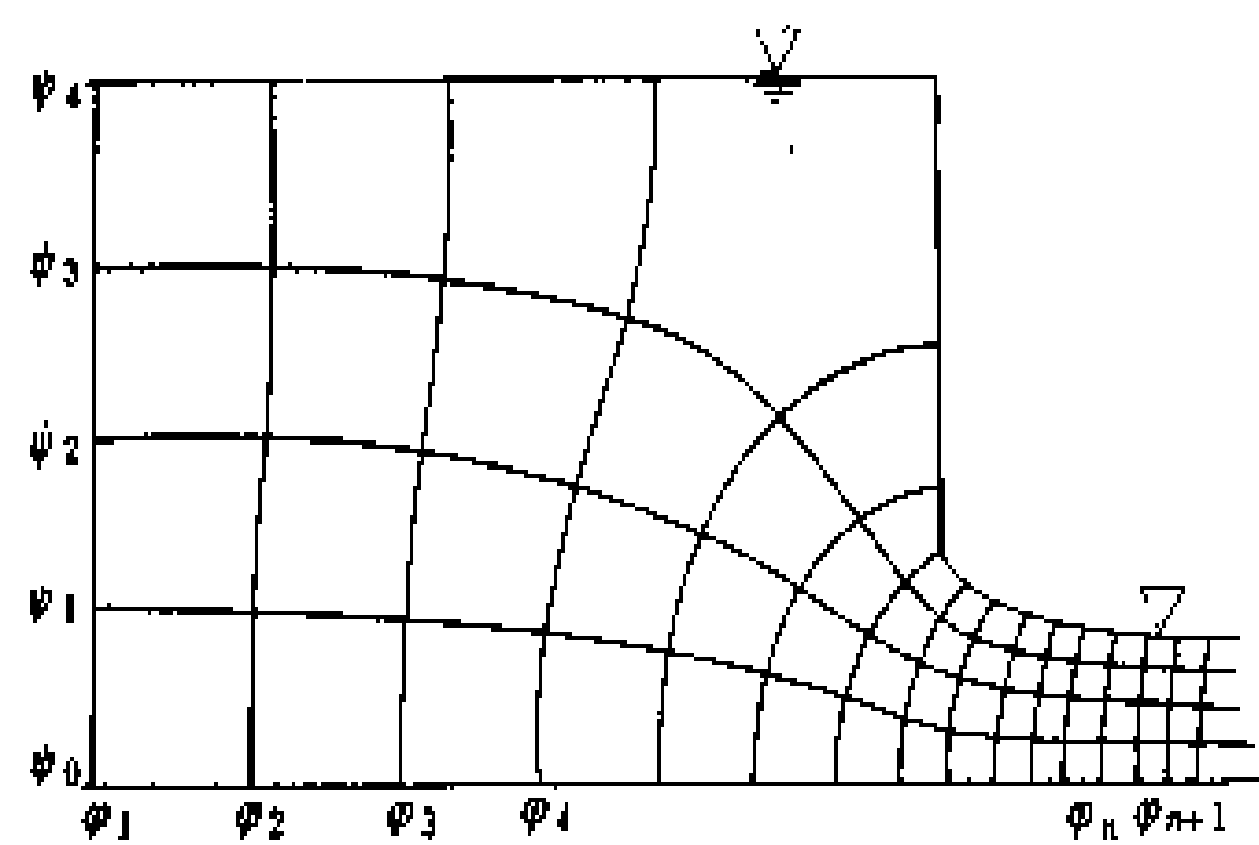
$$W(z) = \varphi + i\psi$$

来表示势流场,用复变函数的方法处理。如:保角变换(保角映射)法就是借助于图形相似与对应原理,用一些已知流场推导复杂流动的流谱。

对于水利水电工程中符合势流条件的流场,利用 φ 与 ψ 正交的原理用“流网法”绘出既定边界条件下 φ 和 ψ 的等值线如图。流网是对流场简明的物理描述。 $\varphi=\text{常数}$,为等势线; $\psi=\text{常数}$,为流线。相邻流线间通过的流量为定数,流线与等势线互相垂直,网格为顶点正交的扭曲四边形。



势流和涡流是表征流体运动的一对专用名词。



流网图

参考书目

普朗特 L. 等著，流体力学概论，郭永怀，陆士嘉译，北京：科学出版社，1981

(时启燧)

shigu zhamen

事故闸门 (emergency gate) 为及时防止水道设施的故障或事故状态扩大，用以截断水流的闸门。设在泄(引)水建筑物工作闸门前事故闸门，在工作闸门发生故障时，需在动水下关闭孔口，待故障消除后，在静水下开启。设在水轮发电机组进水口前的事故闸门，需在动水下限定时间内快速关闭孔口，这种事故闸门称为快速闸门。工作闸门前事故闸门设置的数量视工作闸门孔口孔数、吊运条件和关闭时间等要求而定。有每孔一扇，也有多孔合用的。对发电进水口快速闸门来说，则需每孔设置一扇。

门型及构造特征 门型多数选用平面闸门，其支承结构通常采用胶合层压木滑道、复合材料滑道、滚轮和链轮等。为满足事故闸门动水下门的要求，这些支承行走结构都具有摩阻力小的特征。

启闭方式 为确保向下关闭事故闸门的可靠性，闸门要有足够重量，不足时应采取设置加重块，利用水柱重或机械下压力等措施。如事故闸门为上游止水时，往往设置加重块或采取机械下压力的措施；事故闸门为下游止水时，一般利用水柱压重。同时还应在闸门后设置通气孔，以满足动水下门时，向闸门后而补气，或启门前在闸门后面充水平压时排气。

事故闸门采用在静水中启门的方式。当其下游的事故消除或完成检修工作后，启门前向下游水道充水以达到闸门在前后平压下提起。充水方式有门叶上设置充水阀、门叶节间充水和闸墩内埋设旁通管道充水等方式，其中以门叶上设阀充水较安全可靠，也较经济。除上述三种充水方式外，也有采用事故闸门小开度提门充水的方式。事故闸门在启闭力计算中应核算其闭门力、持住力和启门力，以便选定启闭机的容量和型号。

(沈德民)

shouzu rongliang

受阻容量 (disabled capacity) 见水电站设计水头。

shujing kaiwa

竖井开挖 (shaft excavation) 垂直或大倾角地下井筒开挖的施工过程。竖井开挖常用于水电站调压井、闸门井、出线井、通风井、压力管道等工程，一般采用钻孔爆破法施工，有全断面开挖和先导井后扩挖两种方法。

全断面开挖 自上而下开挖时，先要锁好井口，防止坍塌和在施工中料物坠入井内。在围岩比较稳定而井下无施工通道的小竖井，一般用手风钻自上而下分段钻孔，分段爆破，或用钻机一次钻孔分段爆破，爆后一次成形，用人力或抓岩机配吊桶井架提升石渣，自动翻斗卸渣，矿车或其他运输工具出渣。在围岩不稳定处，要随时支护或预灌浆加固。遇不利节理裂隙组合时，用锚固或锚喷支护。井深较浅而井底又有空间或通道的竖井，也有一次钻孔爆破成井或钻孔后自下而上分段爆破成井的全断面开挖。

先导井后扩挖 大型竖井通常采用先开挖导井与井底出渣通道贯通后再自上而下或自下而上扩大的开挖方法。导井开挖有普通法、深孔法、钻井法、吊罐法和爬罐法等。①普通法。在竖井上部或下部搭设平台钻孔爆破，劳动强度大，进度慢、通风排水困难，用于井深较浅，形状复杂或围岩稳定性差的导井开挖。②深孔法。自上而下钻孔径 100 mm 以上平行深孔，自下而上分段爆破，适用于一般井深的导井开挖。③钻井法。用大直径($\phi \geq 1$ m)钻机一次钻孔成井，适用于井深浅且有大型钻机设备的导井开挖。④吊罐法。沿导井中心钻空孔穿钢绳吊罐，在吊罐内自下而上钻孔，爆破时吊罐提升井外，适用于井深较大围岩稳定性较差的导井开挖。⑤爬罐法。用阿立马克风动爬罐(Alimak Lift)，人员在罐内作业，爬罐上升至工作面钻孔装药后，退回井底一侧避炮，然后爆破，施工安全，适用于井深在 300 m 内的各类围岩。

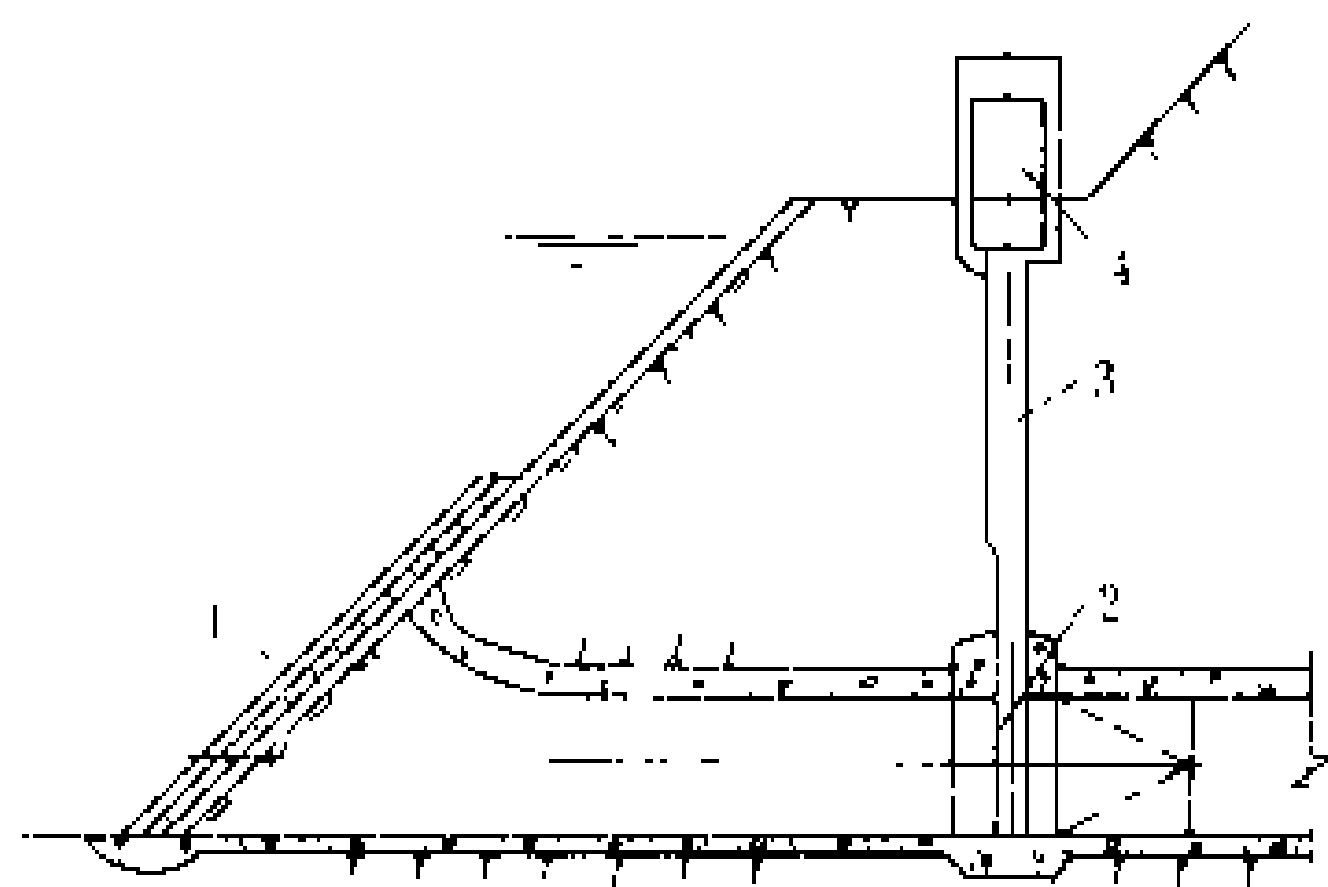
导井开挖后自上而下分段扩挖，石渣从导井溜下，下部设有棚架漏斗或用装载机直接装车输出，上部扩挖钻孔和下部出渣互不干扰。当采用自下而上扩挖时，钻孔爆破可以与集中出渣流水作业，也可在导井内打略向下倾斜的辐射孔分段爆破出渣。

(王守道)

shujingshi jinshuikou

竖井式进水口 (shaft intake) 闸门室设在岸边岩体中，以开凿的竖井作为闸门升降通道的深

孔式进水口。闸门室常设有事故闸门及检修闸门。拦污栅布置在喇叭口的上游端，竖井与喇叭口之间以一段隧洞相连接。若连接隧洞较长，宜将检修闸门布置在喇叭口的上游端；若连接隧洞不长，则可在闸门室内，紧靠事故闸门上游设检修闸门。闸门竖井上口高于最高库水位，可作启闭机的工作平台。竖井式进水口见图所示。



竖井式进水口

1—拦污栅；2 闸门室；3—竖井；4—启闭机室

竖井式进水口与岸塔式进水口相比，结构简单，工程量小，且不受风浪、冰冻的影响，地震影响也较小，但对地质条件要求较高。引水隧洞洞脸地质条件允许时，喇叭口可在库岸岩体中开挖而成；若地质条件不良，则紧靠库岸布置由钢筋混凝土构成的喇叭口。

(丁志华)

shuli tongjifa jingliu tiaojie

数理统计法径流调节 (runoff regulation by mathematical statistics method)

根据实测（含插补延长）年径流资料，计算统计参数，推算径流理论频率曲线，应用概率组合原理，进行水电站水库多年调节的方法。多年调节水电站的调节周期较长，在有限的实测径流系列中，出现连续枯水年组为数不多，用时历法径流调节计算，其计算成果带有较大的偶然性。应用数理统计法，即使没有很长的径流系列，也可以根据概率的原理，组合出各种可能出现的连续枯水年组，以弥补这一缺陷。借用邻近河流的统计参数，也可对本河流径流的统计参数进行修正。适用于径流资料短缺的河流。但是数理统计法径流调节无法求得经调节后水电站的流量、水头、出力及库水位等过程，所以在水电站水能设计和运行中具有一定的局限性。

数理统计法进行多年调节，是将调节库容分为年库容和多年库容两部分。年库容用于调节径流年内分配的不均衡性，是进行年内调节的库容，一般每年都要消落。多年库容是遇连续枯水年才消落的库容，用于调节径流年际间的不均衡性，起多年调节的作用。

年库容计算 可分为简化法和组合法两类。

(1) 简化法。假定同一个调节水（流）量所需的年库容与多年库容的关系非常密切。一般选用若干个年水量等于或接近于调节水（流）量的年份，作为典型年，对各典型年用时历法进行一年的调节计算，求所需的调节库容，从各典型年中选出所需最大的库容即为年库容。

(2) 组合法。假定同一调节水（流）量所需的年库容与多年库容无关，即认为调节任何一年年水量不平衡所需的库容都可能是水电站进行多年调节所需的年库容。因此，可以求出同一调节水（流）量历年所需的年库容绘制频率曲线与所需多年库容的频率曲线进行组合直接求调节库容。

多年调节计算 其基本原理是：①依据全概率公式进行水库蓄水和年来水量概率组合而求得水库多年库容、调节水量和概率的关系。②径流调节是各态历经的过程（即遍历性），这种过程的特征是，从水库任何一个初始的蓄水状态开始，按同一规则进行径流调节，经过若干个调节周期后，水库蓄水的概率分布趋于稳定。

计算方法 有 A. Д. 萨瓦连斯基 (A. Д. Саваренский) 法和 С. Н. 克里茨基 (С. Н. Крицкий) - М. Ф. 明凯里 (М. Ф. Менкель) 第一法、第二法等。第一法与第二法方法近似，而精度较低，从略。

(1) 萨瓦连斯基法。

已知多年平均年水量 $W_{\text{ма}}$ ，多年平均流量 $Q_{\text{ма}}$ ，年径流量离差系数 C_v 及偏差系数 C_s ，绘出以年径流量相对值 K 表示的年径流频率曲线据以绘制保证率曲线，如图 1 所示。图 1 中， $K = W/W_{\text{ма}}$ ， W 为年水量。

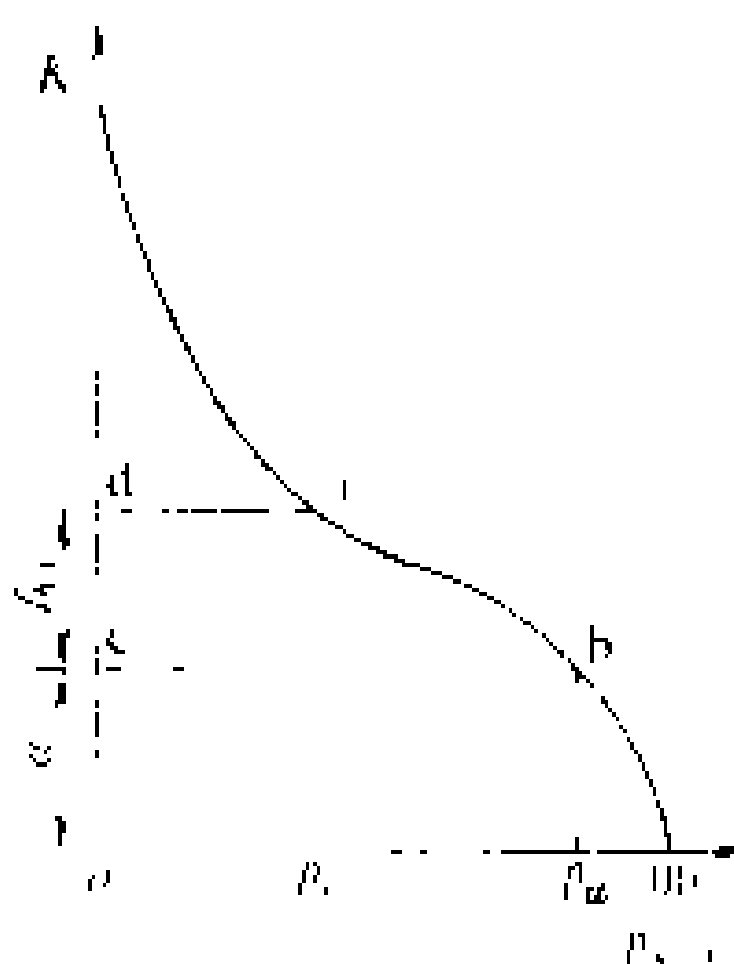


图 1 年径流保证率曲线

多年库容 $V_{\text{ма}}$ 按总调节库容减年库容求得。调节流量 Q_r ，是假定的。其各自的相对值 β_m 和 α 分别为

$$\beta_m = V_{\text{ма}} / W_{\text{ма}}$$

$$\alpha = Q_r / Q_{\text{ма}}$$

首先，求第一年末水库蓄水保证率曲线：①假设计算从库空（或任一蓄水状态）开始，即第一年年初水库没有蓄水。②在年径流保证率曲线上作一水平线，使其距横轴为 α 。③在第一根水平线以上，距离为 β_m 处作第二根水平线，将天然年径流保证率曲线分为三部分。第一部分在曲线上的 a 点左边，这些年份的径流除保证供水并将水库蓄满外，尚有余水，它所相应的保证率 p_a 即为肯定蓄满的保证率；第二部分在曲线上的 b 点

右边,这些年份供水不能得到保证,它所相应的保证率(100- p_a),即为肯定破坏的保证率;第三部分介于曲线上a、b两点之间,这些年份的径流除保证供水外,尚有余水蓄入库内,但不一定能蓄满,即水库部分蓄水的保证率为 $p_a - p_\beta$ 。④图1中abcd即为第一年末水库蓄水保证率曲线(见图2)。

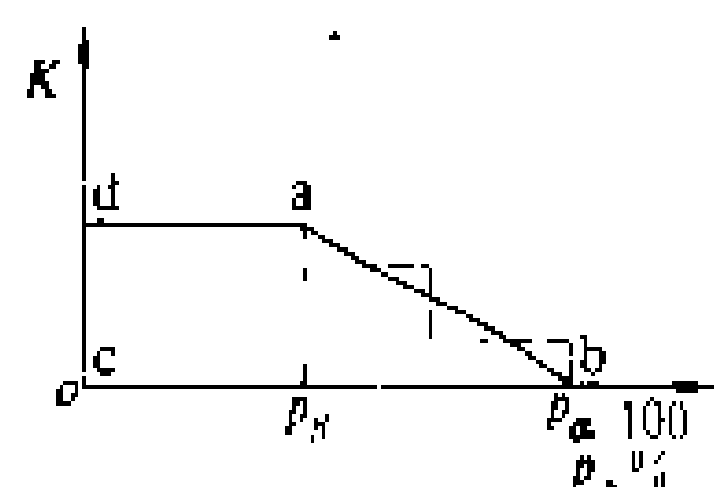


图2 第一年末水库蓄水保证率曲线

再求第二年末的蓄水保证率曲线:①将图2中梯形abcd的ab曲线段以面积相等的原则以若干个阶梯近似,如虚线所示共四个阶梯。②根据概率相乘原理,将图1所示天然径流保证率曲线的横坐标按比例缩短,将其叠加在图2所划分的各个阶梯上,如图3所示。③在距横轴 α 处作第一条水平线,距横轴 $\alpha + \beta_m$ 处作第二条水平线(见图3)。④两条水平线之间包含了第一年年末不同初蓄情况下第二年年末的蓄水保证率曲线。水库初蓄为满库 β_m 时,年终蓄水保证率曲线为abcd;水库初蓄为部分蓄水 $n\beta_m$ 时,年终蓄水保证率曲线为efgh;水库初蓄为部分蓄水 $n'\beta_m$ 时,年终蓄水保证率曲线为ijkl;水库为空库时,年终蓄水保证率曲线为mnop。⑤根据概率相加原理,将图3所示不同初蓄情况下的年终蓄水保证率相加,即在图3上以若干个不同的纵坐标上,作水平线,与各阶梯上的来水保证率曲线相交,截取各相应的保证率,如

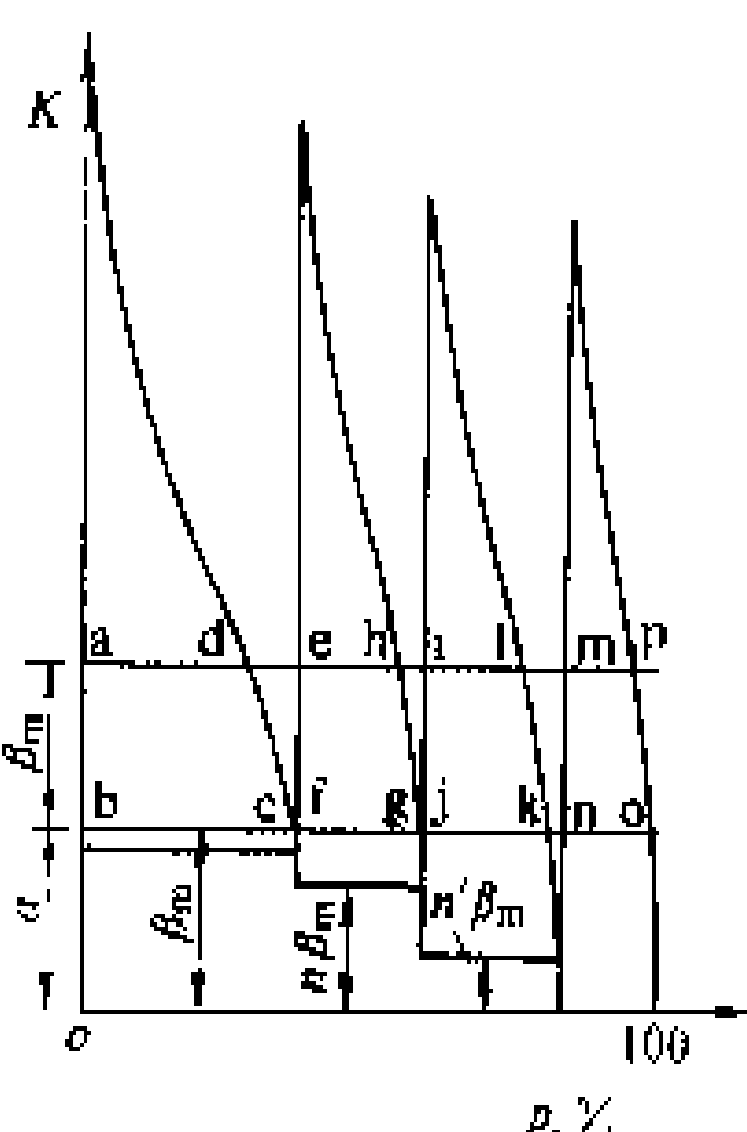


图3 终蓄保证率曲线图解

不同初蓄情况下的年终蓄水保证率相加,即在图3上以若干个不同的纵坐标上,作水平线,与各阶梯上的来水保证率曲线相交,截取各相应的保证率,如

$$p_\beta = ad + ch + il + mp, p_a = bc + fg + jk + no, \dots$$

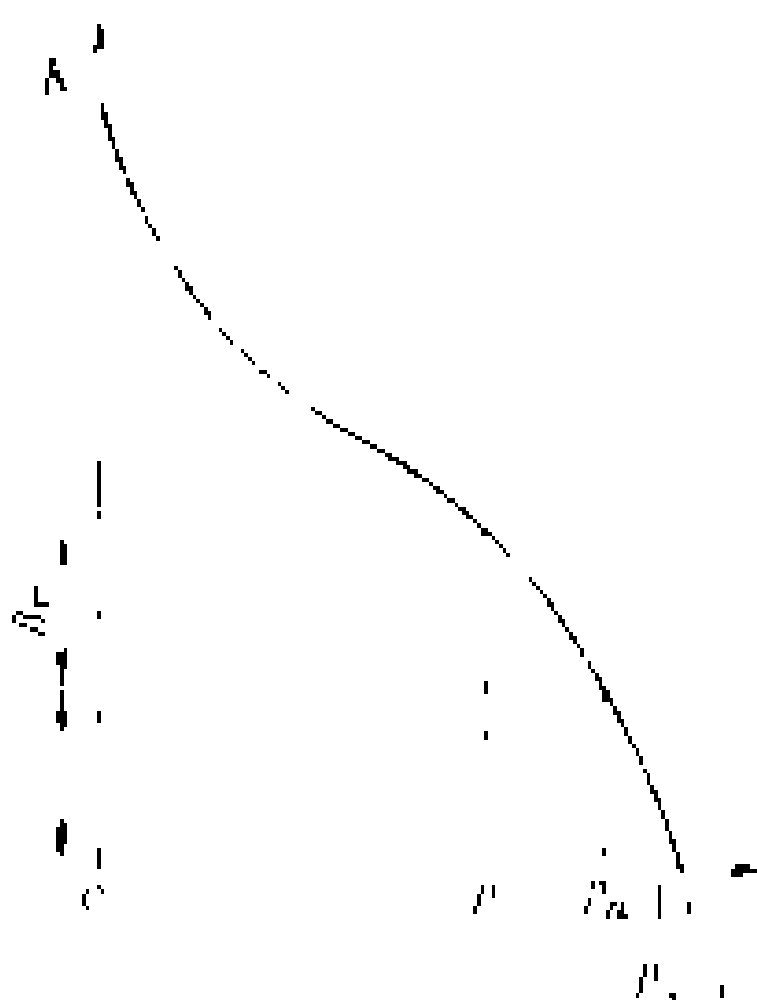


图4 第二年末水库蓄水保证率曲线

使得第二年末的蓄水保证率曲线,如图4所示。

依此类推,求得第3、4、...年年末蓄水保证率曲线。随着计算年数的增加,两个相邻年份之蓄水保证率曲线逐渐接近,最后趋向于重合(见图5),该线即为所求的水库蓄水保证率稳定曲线,曲线上的 p_a 为所求的供水保证率,100

- p_a 为供水破坏的保证率, p_β 为保证供水 α 外水库尚能蓄满的保证率。

若 p_a 等于所要求的设计保证率,则结束计算;否则,重新假定调节流量的相对值 α ,进行下一轮计算,直至满意为止。

(2) 克里茨基-明凯里第二法。与萨瓦连斯基法相似,须先假定调节流量相对值 α ,然后用概率演算法,求与 α 相应的供水保证率,并以供水保证率等于要求的设计保证率为收敛条件。

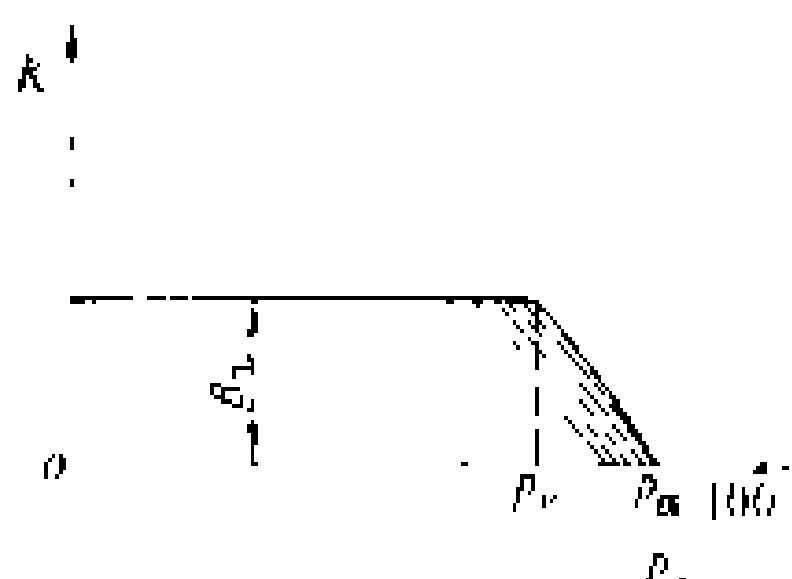


图5 逐年蓄水和蓄水保证率稳定曲线

将天然年径流保证率曲线分为能保证供水年份,有条件保证供水年份和不能保证供水年份三部分。

对一年来水情况:①当 $K_1 < \alpha - \beta_m$ 时,为不能保证供水年,其破坏的概率为 S_1 。②当 $K_1 > \alpha$ 时,为能保证的供水年。③当 $\alpha > K_1 > \alpha - \beta_m$ 时,视水库蓄水情况而定,为有条件的保证供水年,其概率为 N_1 。

以 N_1 这一段概率曲线与两年来水量的频率线组合后:①当 $K_1 + K_2 < 2\alpha - \beta_m$ 时,其破坏的概率为 S_2 。②当 $2\alpha > K_1 + K_2 > 2\alpha - \beta_m$ 时,其概率为 N_2 。

再以 N_2 这一段概率线与三年来水量频率曲线组合:①当 $K_1 + K_2 + K_3 < 3\alpha - \beta_m$ 时,其破坏的概率为 S_3 。当 $3\alpha > K_1 + K_2 + K_3 > 3\alpha - \beta_m$ 时,其概率为 N_3 。

依此类推,不肯定的区域 N 越来越小,最后收缩到很小范围,于是得水库供水的破坏概率为

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + \dots \quad (1)$$

则供水保证率为 $p_a = 1 - S$ 。

以上计算过程示于图6。

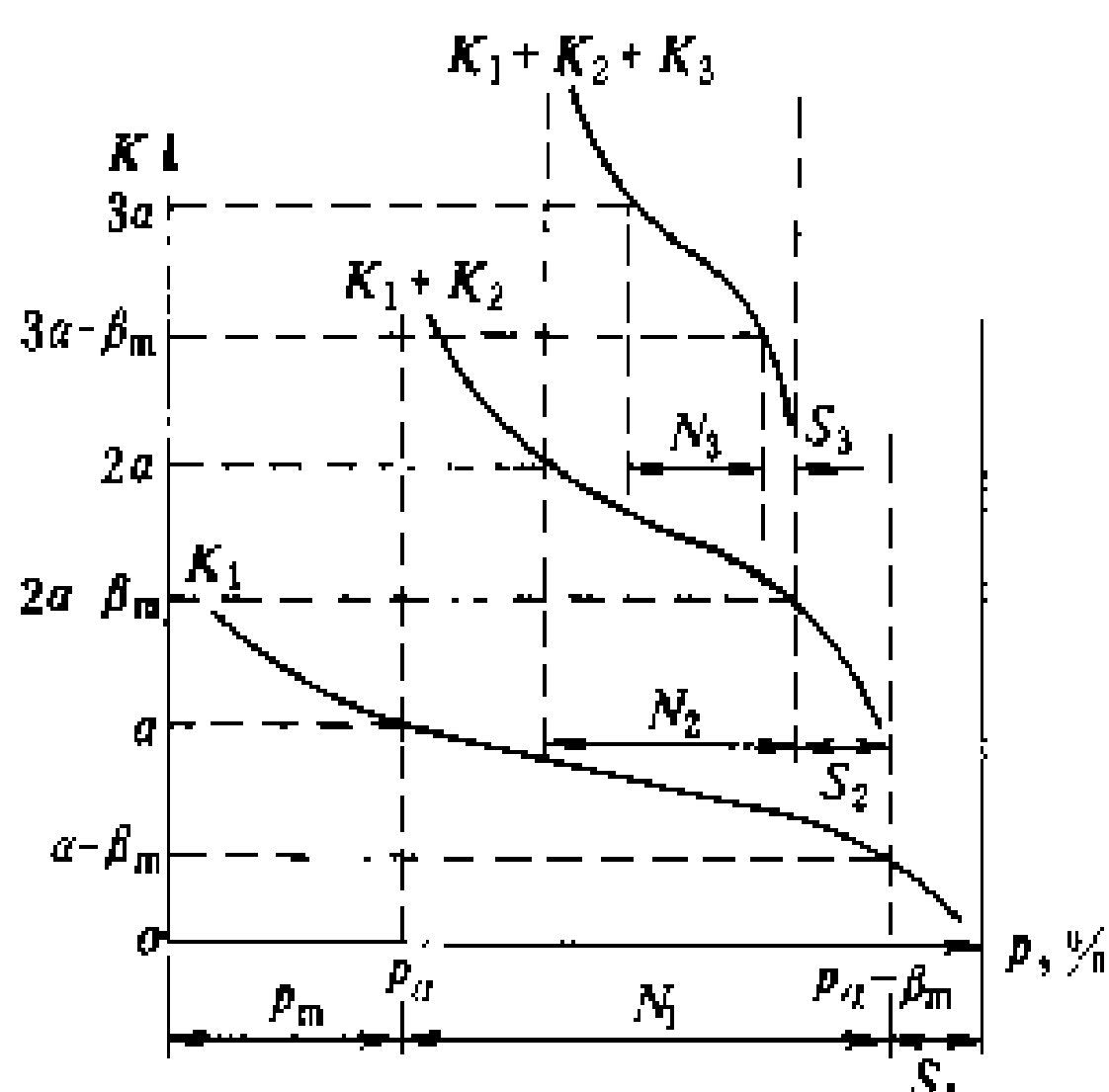


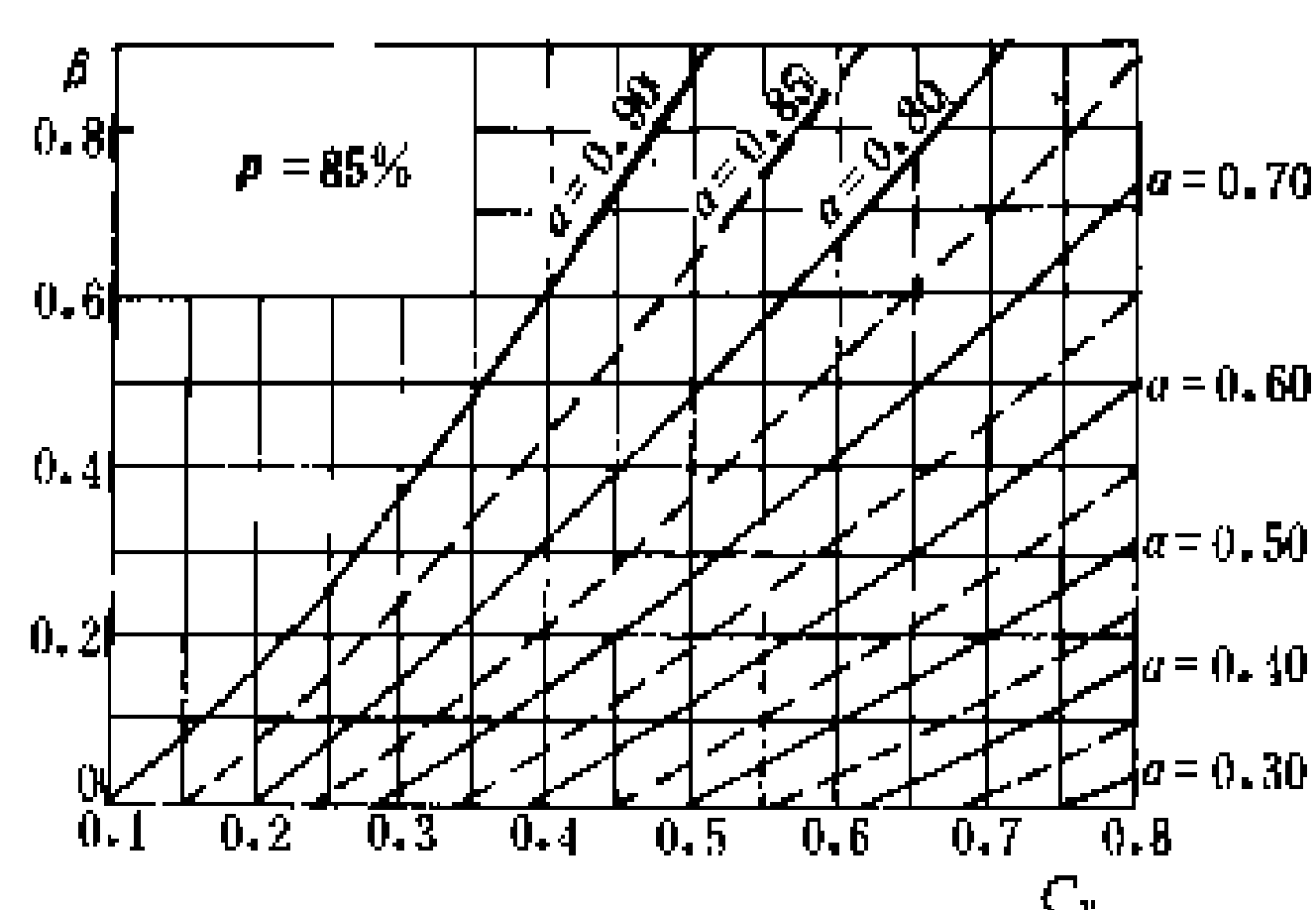
图6 第二法供水保证率计算过程示意图

如果年径流之间存在有相关关系时,对 n 年组年径流的离差系数可用下式修正

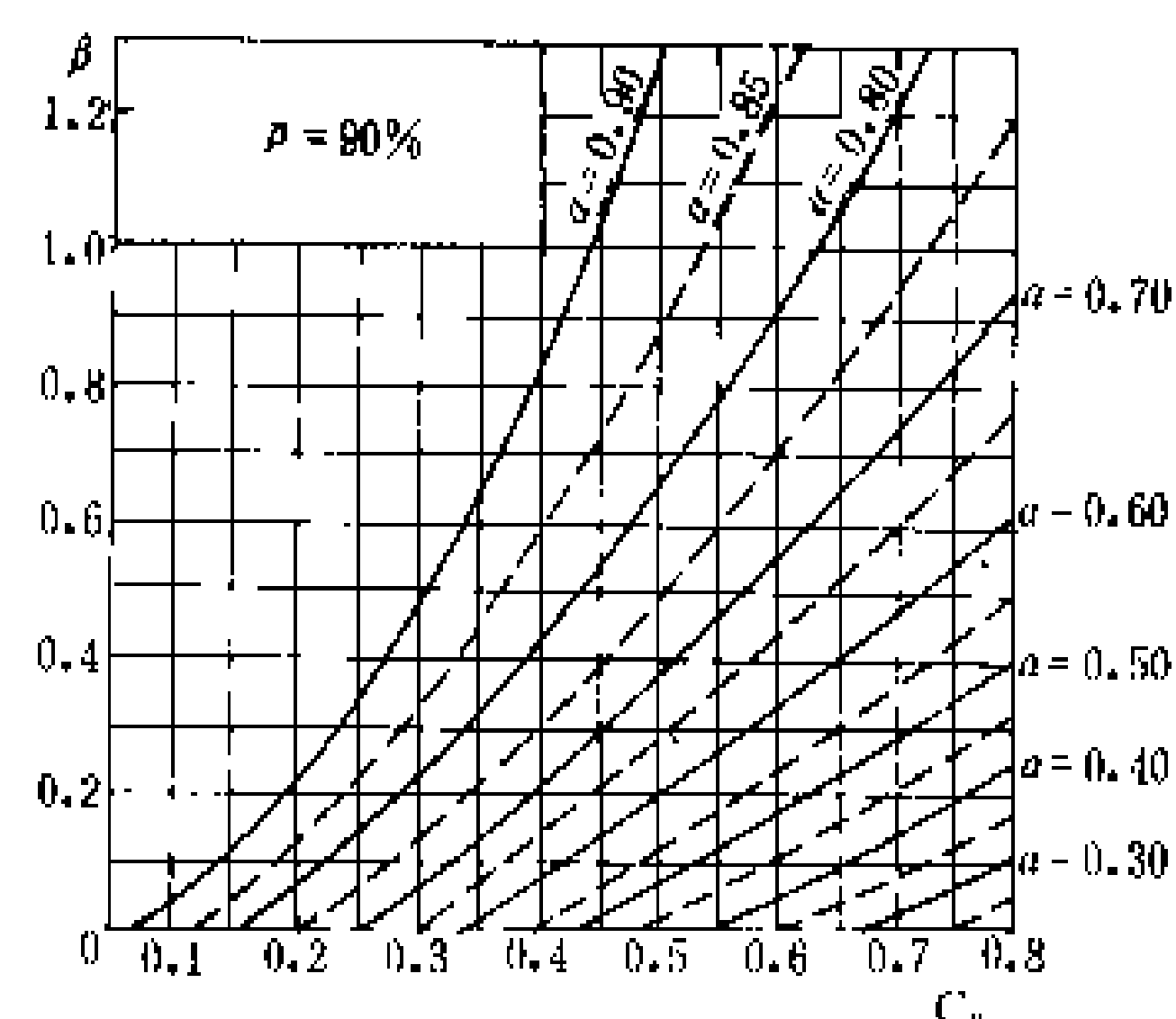
$$C_v^{(n)} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \left\{ 1 + \frac{2}{n} [r_1(n-1) + r_2(n-2) + r_3(n-3) + \dots] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中 r_1 为面临年份和它后面一年的径流之间相关系数； r_2 为面临年份和它后面隔一年的径流之间相关系数； r_3 为隔二年；……。

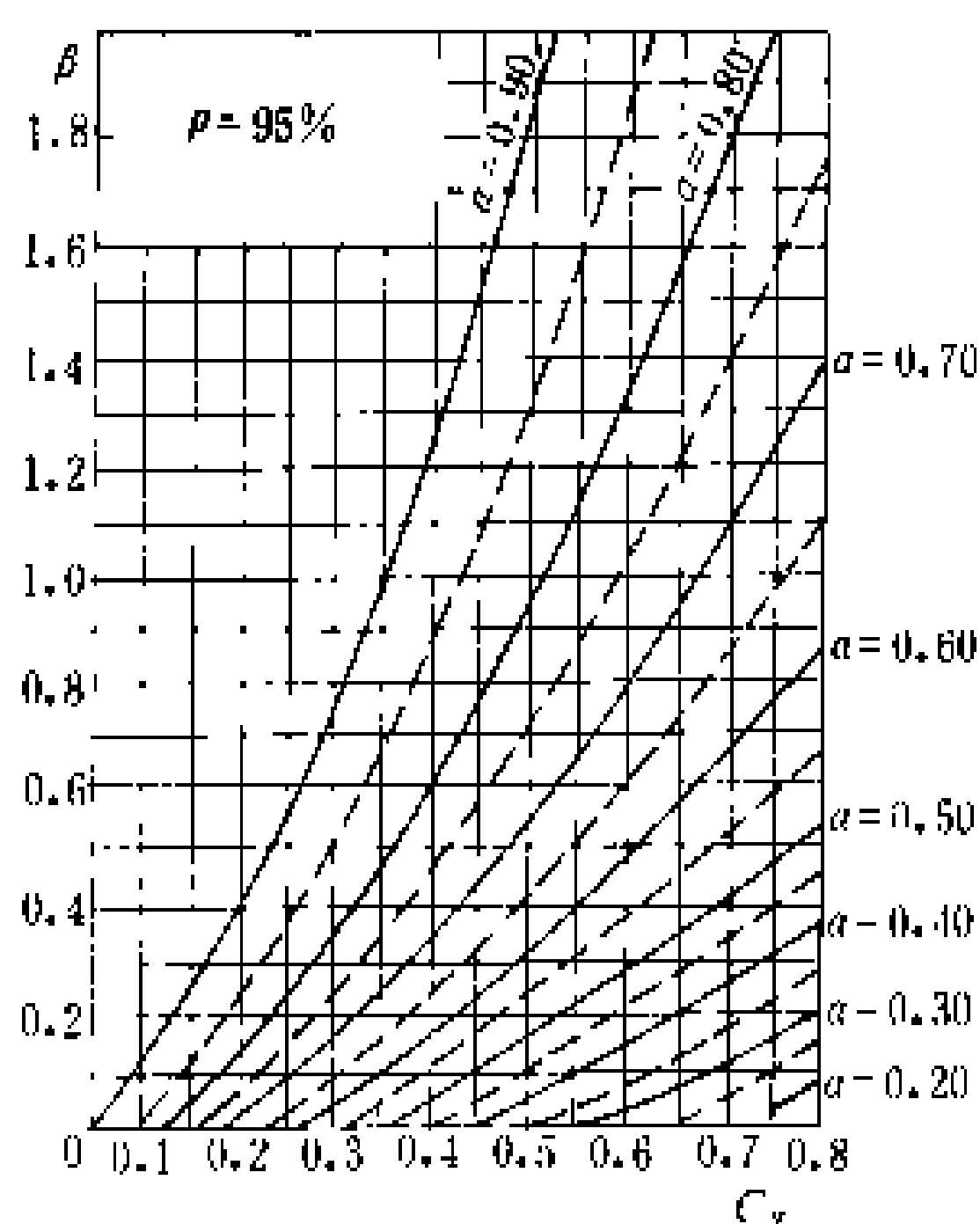
普列什科夫线解图 用频率组合的原理和方法精确地求解时，保证率、调节水（流）量和多年库容三者之间的关系，非常繁复。为此，Я. Ф. 普列什科夫（Я. Ф. Плешков）于 1939 年根据上述第二法作出了在 $C_s = 2C_v$ 情况下， $p = 75\%$ 、 80% 、 85% 、 90% 、 95% 、



(a)



(b)



(c)

图 7 普列什科夫线解图

97% 的线解图，见图 7。已知保证率 p ，年径流离差系数 C_v ，调节系数 α ，便可查得多年库容系数 β_m ，则多年库容为 $V_m = \beta_m W_m$ ，为数理统计法径流调节计算多年库容带来很大的方便。

为了使 $C_s \neq 2C_v$ 时也能直接应用普列什科夫线解图，中国学者推导了一个换算公式

$$C_v' = C_v / (1 - \alpha_0) \quad (3)$$

$$\alpha' = \alpha - \alpha_0 / (1 - \alpha_0) \quad (4)$$

式中 $\alpha_0 = (m-2)/m$ ； $m = C_s/C_v$ 。

由 C_v' 、 α' 查普列什科夫线解图得 β'_m ，则

$$\beta_m = (1 - \alpha_0) \beta'_m \quad (5)$$

数理统计法径流调节的方法和步骤可概括如下：

①确定供水保证率 $p(\%)$ ，计算天然年径流统计参数 W_m （或 Q_m ）、 C_v 、 C_s ；②如 $C_s \neq 2C_v$ ，利用公式 (3) 进行修正，假定不同的调节系数 α 值，在对应保证率 $p(\%)$ 的普列什科夫线解图上求得相应的 β_m 值；③用上述简化法求各个 α 值的年库容 V_s ，与多年库容 $V_m = \beta_m W_m$ 相加得调节库容 V_r 。如果采用组合法，则先不确定 $p(\%)$ ，根据不同的 α 值在不同 $p(\%)$ 的普列什科夫线解上求得相应的 β_m ，换算年库容 V_m 后绘制频率曲线，再与不同 α 值相应 V_s 的频率曲线进行组合，直接求某一 $p(\%)$ 的 V_r 与 W_r (Q_r)。

参考书目

电力工业部成都勘测设计院主编，水能设计，北京：电力工业出版社，1981

（许自达）

shuangchong tiaojie

双重调节 (double regulation) 对水轮机的两个互相协调的执行机构的控制。轴流转桨式水轮机、装有调压阀的混流式水轮机和冲击式水轮机在运行中除了需要控制导水叶或喷针以维持其转速为某一定值外，还有桨叶角度、调压阀和折向器需要控制以扩大转桨式水轮机高效率区的宽度、减小装有调压阀的混流式水轮机前压力管道内压力的变化和减小冲击式水轮机甩负荷时的转速升高。工程中采用双重调节调速器来实现这些水轮机的双重调节。双重调节调速器由主调节和协调调节两大部分组成。主调节部分即导水叶操作部分（见水轮机调速器）。协调调节部分主要由协调装置和功率放大随动系统组成。

转桨式水轮机的双重调节 转桨式水轮机的两个互相协调的执行机构是导水叶接力器和桨叶接力器。转桨式水轮机最高效率的桨叶角度与工作水头和导水叶开度有关，这种桨叶角度与各种工作水头和各种导水叶开度的对应关系叫做协联。实现协联的方式有机械协联、机-电协联和电气协联三种方式（见图 1）。

(1) 机械协联方式框图见图 1 (a)，其输入量有导水叶开度 a 和水头 H ，输出量是 φ' 。这些量都是机械位移。协联关系由凸轮形状保证。改变协联关系困难。凸轮制造也困难，协联精度不高。

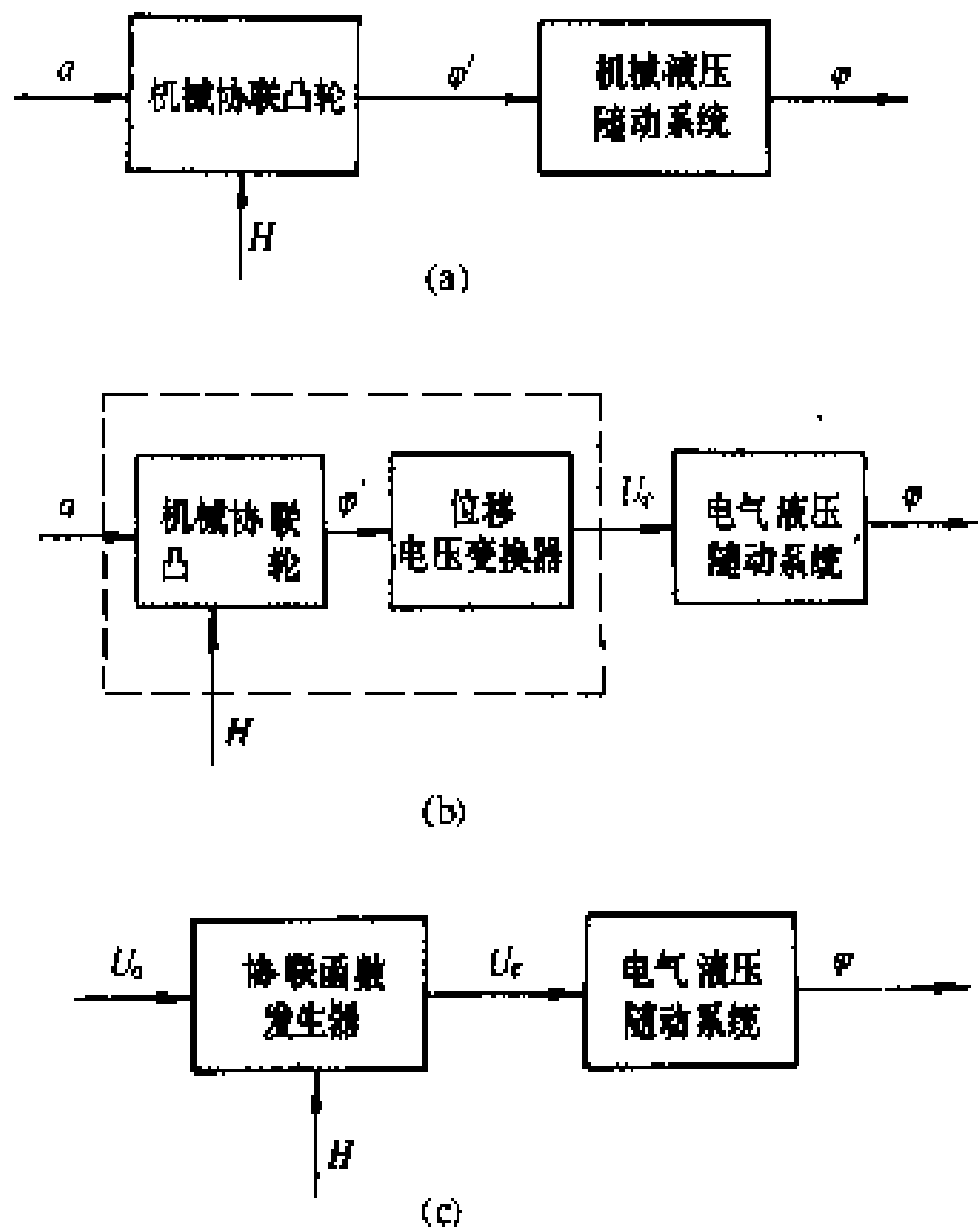


图 1 协联方式框图

(a) 机械协联；(b) 机-电协联；(c) 电气协联

(2) 机-电协联方式框图见图 1 (b)，其输入量也是导水叶开度 a 和水头 H ，它们是机械位移。输出量为电气量 U_{φ} 。协联关系由凸轮形状保证。要求凸轮的输出功率不大，可用易加工的材料，凸轮制造较容易，电液随动系统的误差较小。

(3) 电气协联方式框图见图 1 (c)，其输入输出量均为电气量， U_a 为协联装置输入量， U_{φ} 为协联装置输出量，协联关系由电气协联函数发生器保证。电气协联函数发生器制造方便，协联关系调整改变容易，通用性好，电液随动系统的误差较小。

装有调压阀的混流式水轮机的双重调节 装有调压阀的混流式水轮机的两个需互相协调的执行机构是导水叶接力器和调压阀活塞。要求在机组甩负荷或紧急停机导水叶快速关闭的同时迅速开启调压阀，下泄部分水量，保证压力水管内的压力上升不致过高。出于安全性的考虑，还要求在调压阀万一失灵或拒动时，导水叶接力器只能以允许的慢速度关闭。实现这种协调动作的常用方法是直接(或间接)应用缓冲器来控制调压阀的活塞(见图 2)。主配压阀将主接力器的左腔接通排油使导水叶迅速关闭时，由于节流孔来不及补充压力油而使调压阀活塞的左侧压力急剧下降。调压阀在蜗壳内水压力的推动下迅速打开排水，降低蜗壳压力。调压阀的开启使主接力器的右腔维持较高的压力从而反过来促使导水叶的关闭。调压阀失灵或拒动时，由于节流孔来不及补充压力油从而限制了导水叶关闭

的速度。当机组容量较大或在系统中需担任调频任务或地区负荷对电能质量要求较高的个别情况下，除了上述要求外，还要求调压阀能调节流过压力水管内的流量使其具有较小的变化率，从而保证机组突增负荷时频率下降不致过大。实现这种调整作用的协联装置比较复杂，要根据具体要求进行设计。

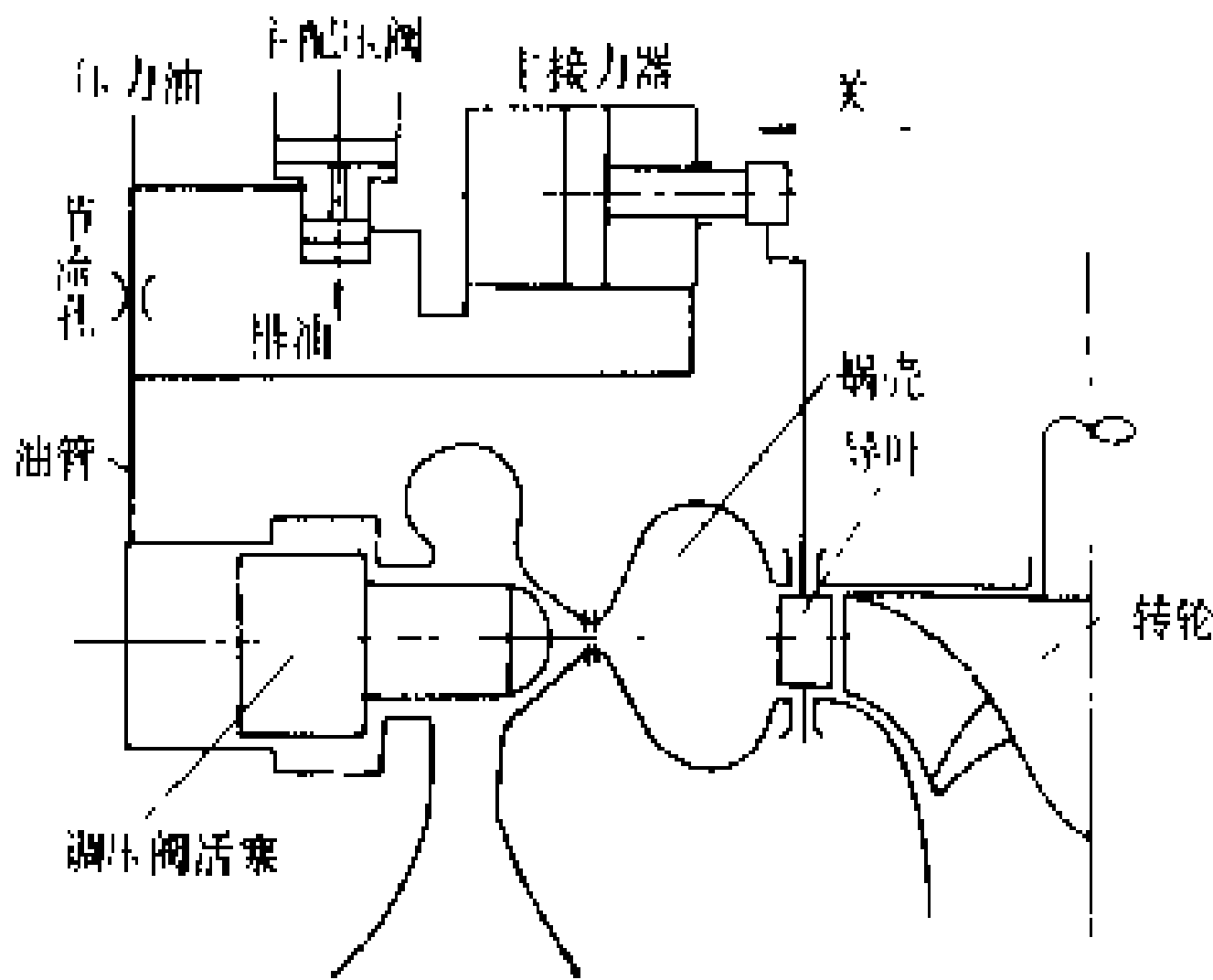


图 2 调压阀控制原理简图

冲击式水轮机的双重调节 冲击式水轮机的两个需互相协调的执行机构是喷针和折向器。正常运行时，根据喷嘴射流的直径控制折向器的位置使其总是处于射流的边缘但不接触射流的位置。当甩负荷时，折向器迅速切入射流使水流的方向改变不再射到水斗上，从而防止了机组的转速升高过大。中国一般选用一台单调节调速器来控制折向器，利用一个喷针凸轮来实现喷针与折向器间的协调关系并在主机上配置一套随动系统来控制喷针。国外冲击式水轮机专用的双重调节调速器有单调节调速器外加一油阻尼器系统和双活塞冲击式水轮机调速器等多种结构和型式。

(张学中)

shuang muxian jexian

双母线接线 (double-bus connection)

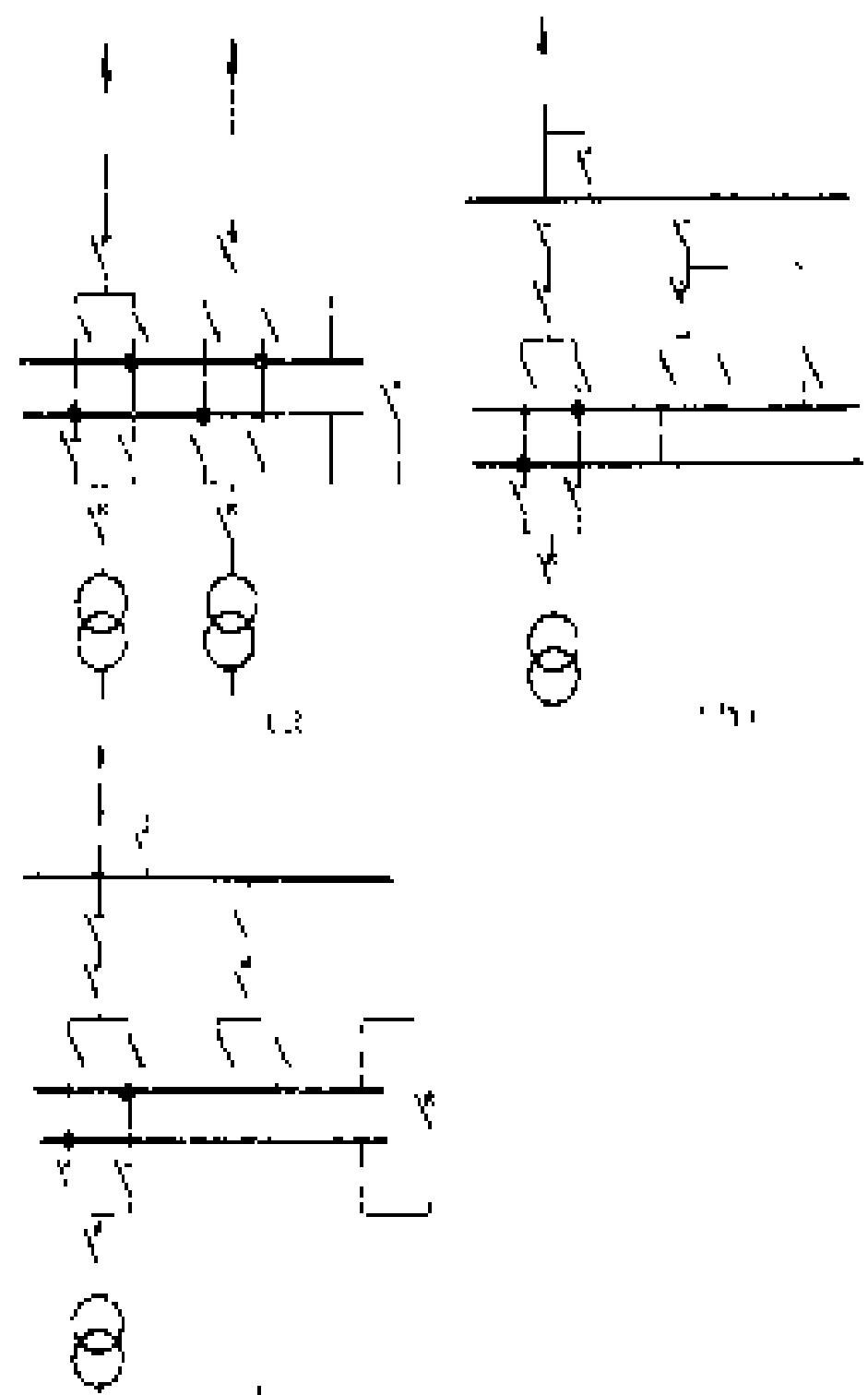
电源和出线回路汇集在两条汇流母线的电路。两条母线经常同时工作，并可通过母线联络断路器并联运行。根据每一回路中所用断路器数目不同，有单断路器的双母线接线和双断路器的双母线接线。双断路器双母线接线具有较高的可靠性和灵活性，当一条母线发生短路时，所有连接在这条母线上的电源和出线的断路器都自动断开，另一条母线仍可以继续工作。检修任何回路中的任一台断路器时，该回路仍可以通过另一台断路器供电。各回路均用断路器进行操作，隔离开关仅作为检修时隔离电压之用。但是这种接线要用较多的断路器和隔离开关，经济性较差，目前很少采用。仅在电力系统中占重要地位的特大型水电站才考虑采用。例如 20 世纪 50 年代建成的苏联伏尔加水电站(装机

20×115 MW, 当时出线电压为 400 kV) 和于 70 年代建成的美国腊孔山 (Raccoon Mountain) 抽水蓄能电站 (装机 4×382.5 MW, 出线电压为 161 kV) 采用了此种接线。

常用的单断路器双母线接线分为双母线无旁路母线接线和双母线带旁路母线接线两种。后一种接线中有母联与旁路母线共用一组断路器的, 也有设专用旁路断路器的。

单断路器双母线无旁路母线接线 此种接线见图 (a), 其特点是: ①可以轮流检修母线而不致使供电中断, 只需将要检修的那条母线上的全部元件倒闸到另一条母线即可。

②一条母线所连接的设备故障, 不影响另一条母线供电。将故障线路所接回路切换到另一条母线后即可恢复供电, 运行灵活可靠。③调度灵活, 各个电源和出线回路的负荷可任意分配到某一条母线上, 因而可以灵活地适应系



双母线接线图

统中各种运行方式调度和潮流变化的需要。④扩

建方便, 双母线接线可顺延扩建, 施工时也不会引起原有已运行设备的长期停电。当有双回线路时, 可以顺序布置, 而不致象单母线分段接线那样, 为连接于不同母线段而导致出线的交叉跨越。⑤便于试验, 在个别回路需要单独试验时, 可将该回路分开, 单独接至一条母线上。其不足之处是: ①隔离开关数量多, 切换母线操作过程比较复杂, 容易造成误操作, 而且不利于实现自动化和远动化。②增加了母线长度和使每回路增加一组母线隔离开关, 还使配电装置构架增加, 占地面积增大, 投资增多。③母联断路器故障需短时全电站停电。④母线或进出线断路器故障需短路停运全电站的一半容量。为了克服上述③、④的不足, 有将双母线中的一条母线或两条母线都作成分段 (分成两段或多段) 的双母线分段 (包括多分段) 接线, 以提高供电的可靠性。

双母线接线一般适用于在电力系统中比较重要且线路的断路器检修时允许停电的大中型水电站。当出线电压为 110~220 kV, 出线回路数超过 4 回; 当出线

电压为 35~60 kV, 出线回路数超过 6~8 回; 或连接的电源较多、负荷较大时均可采用。

单断路器双母线带旁路母线接线 有两组主母线和一组旁路母线。当线路断路器检修时由旁路断路器替代, 也有当线路和进线断路器检修时均可由旁路断路器替代的。但水电站一般采用线路断路器检修时由旁路断路器替代的双母线带旁路母线接线。并且旁路断路器可以是专用的, 也可以由母联断路器兼用的。

(1) 双母线母联兼旁路断路器接线。双母线接线并利用母联断路器兼作旁路断路器的接线方式, 见图 (b)。特点是检修任一线路断路器时, 可将母联断路器用作旁路断路器, 线路可不停电。而双母线接线虽也可以用母联断路器暂时替代检修的线路断路器, 但必须加装旁路隔离开关或临时用跨条将检修的线路断路器短接, 然而此时线路需短时停电。因此本接线方式的供电可靠性较高。不足之处是: ①接线较复杂, 母联兼旁路共用一组断路器, 增加母联断路器的负担和隔离开关切换工作量, 相应增加故障率和检修次数。②母联断路器作旁路断路器运行时, 两条母线需解列运行, 负荷平衡受到限制。③增加一条旁路母线和相应的设备, 比双母线接线布置较复杂, 增加面积和投资。

双母线母联兼旁路断路器接线, 一般适用于出线回路不多、出线断路器检修时线路不允许停电的大、中型水电站。

(2) 双母线带专用旁路断路器的双母线带旁路母线接线。双母线接线并增设一条旁路母线的接线方式, 见图 (c)。母联和旁路各自专设断路器, 它既有双母线接线的优点, 又克服了双母线母联兼旁路断路器接线的缺点。因此这一接线的可靠性和灵活性都较高, 但经济性较差。另外, 也还存在母联断路器故障短时全电站停电; 母联断路器检修时两条母线需解列运行或按单母线运行; 隔离开关切换操作工作量大, 继电保护复杂, 不利于实现自动化; 增加设备和投资, 增大布置面积等问题。

双母线带专用旁路断路器接线一般适用于 110 kV 出线超过 5~6 回, 220 kV 超过 4 回的较重要的大、中型水电站, 也适用于 330~500 kV 的大型水电站。

当采用气体绝缘金属封闭电器时, 许多输电电压为 330~500 kV 的大型水电站采用单断路器双母线接线。例如中国安康水电站 (4×200 MW) 330 kV 侧 4 回进线、4 回出线就采用了双母线接线; 龙羊峡水电站 (4×320 MW) 330 kV 侧 4 回进线、6 回出线采用了双母线, 其中一条母线用断路器分段和出线带旁路隔离开关的接线。巴西的弗斯多利亚 (Fozdoareia) 水电站 500 kV 侧 6 回进线、6 回出线采用了双母线进线带旁

路隔离开关的接线。

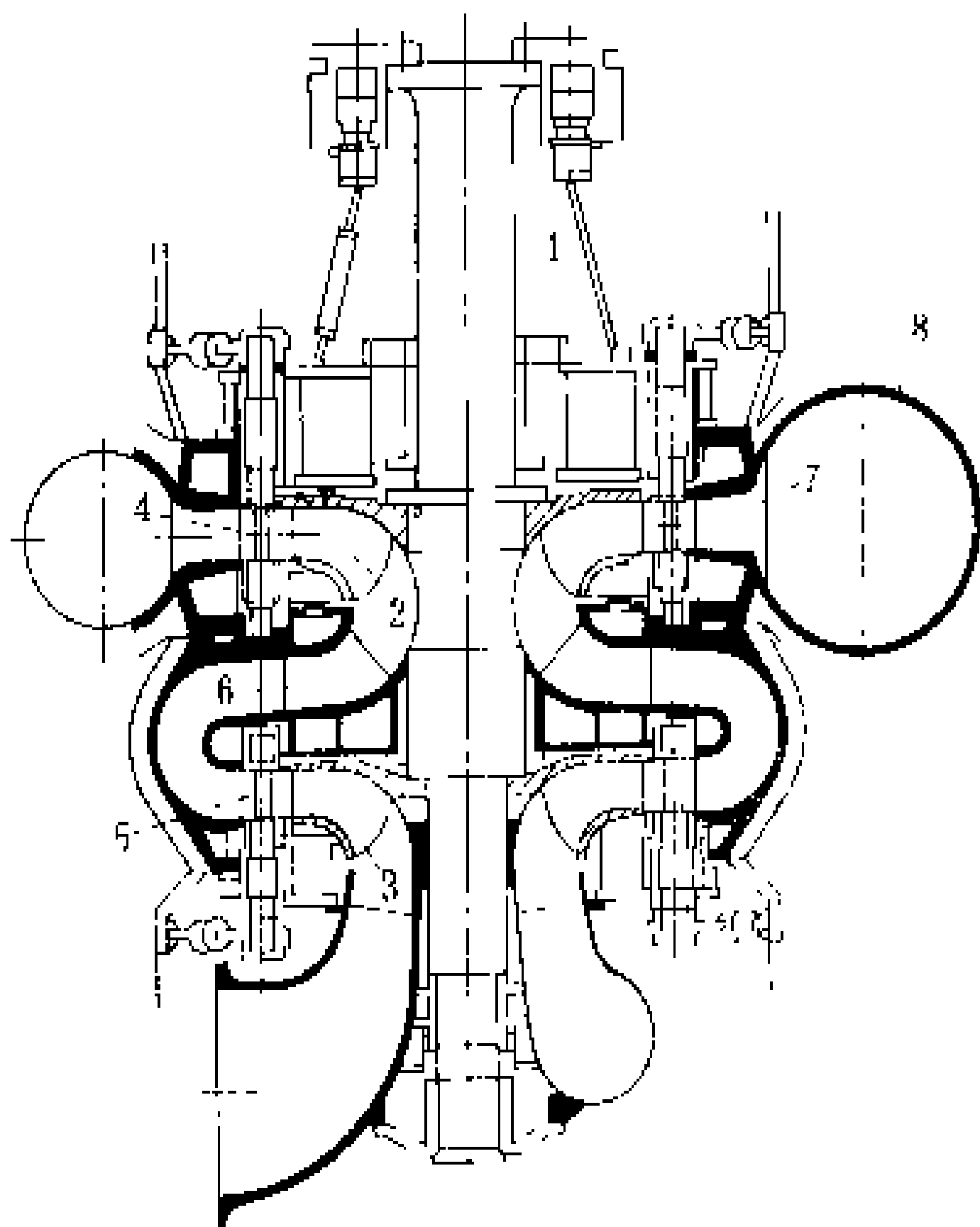
(潘天禄)

shuibeng shuilunji

水泵水轮机 (pump-turbine) 可作为水轮机运行又可作为水泵运行的水轮机。由于上述两种运行工况下水轮机的转动方向不同,水流方向也相反,因而又称为可逆式水泵水轮机,应用于抽水蓄能电站。根据使用电站水头的不同,水泵水轮机又分为混流式、斜流式和贯流式。其中使用最为广泛的是混流式水泵水轮机。斜流式也应用于大中型水电站,贯流式则多应用于潮汐电站。此外,在一些装有轴流泵的泵站,亦有利用轴流式水泵反转进行发电的,这种轴流式水泵水轮机应用并不广泛。

混流式水泵水轮机 根据抽水蓄能电站的水头/扬程不同以及特定的运行要求,混流式水泵水轮机又分为单级式和多级式(2级以上)。单级式系指水泵水轮机轴上只装有一个转轮;多级式则指装有2个(称为双级)或2个以上的转轮。单级式水泵水轮机的使用水头/扬程目前已达700~800m;多级式则可用到1000m以上。最多的转轮级数为7级。

单级混流式水泵水轮机的结构及包括的部件与常规的混流式水轮机基本相同,只是转轮的形状与水泵的泵轮相似,转轮的名义直径比相同水头、出力下的常规水轮机名义直径约大30%~40%。双级混流式水泵水轮机的结构见图。与单级相比,多级式不设导水机构。



双级混流式水泵水轮机结构图

1—主轴;2—第二级叶轮;3 第一级叶轮;4—第二级导水叶;5—第一级导水叶;6 整流叶片;7—座环;8—蜗壳

斜流式水泵水轮机 对于中、低水头/扬程的抽水蓄能电站,为适应水头/扬程变幅较大时,可采用斜流式水泵水轮机。其适应的水头/扬程范围为30~130m。斜流式水泵水轮机的结构与斜流式水轮机相同。

贯流式水泵水轮机 贯流式水泵水轮机亦为可逆式,用于有双向运行功能的潮汐电站。可以在两个流向发电或抽水,因而亦称为双向可逆式水泵水轮机。其结构与贯流式水轮机基本相同。

发展及使用现状 水泵水轮机技术是在近30年来,随着抽水蓄能电站的建设才迅速发展起来的。混流可逆式水泵水轮机于1931年首次安装在意大利的格拉·拜顿水电站,单机容量为0.6MW。抽水蓄能电站发展较快的是美国、日本和西欧各国。已建的抽水蓄能电站中,使用水头最高的单级混流可逆式水泵水轮机为保加利亚的茶拉(Chaira)水电站,水轮机工况的最大水头为677m,单机额定出力216MW;水泵工况的最高扬程为701m,最大抽水流量 $29.5\text{ m}^3/\text{s}$,转轮直径3.52m,转速600r/min。已运行的单机出力最大的水泵水轮机为美国巴斯康蒂(Bath County)抽水蓄能电站的水泵水轮机,水轮机工况在329m水头下额定出力为380MW,最大出力457MW,最大水头为390m;水泵工况最高扬程387m,抽水流量 $85\text{ m}^3/\text{s}$,在扬程335m时抽水流量为 $116\text{ m}^3/\text{s}$,转轮直径6.35m,转速257.1r/min。

具有代表性的多级可逆式水泵水轮机安装在意大利的埃德罗(Edolo)抽水蓄能电站,其最高水头/扬程为1256m/1289m,为当前应用水头/扬程最高的水泵水轮机,水轮机工况最大出力128MW,5级,转轮直径2.215m,转速600r/min;单机出力最大的为法国的勒·柯洛(Le Clou)电站,双级可逆式水轮机工况最大出力286MW,水泵工况最大输入功率244MW,最高水头/扬程1037m/1067m,转速600r/min;使用水头最高的斜流式水泵水轮机安装在日本的高根第一(Takane I)电站,最高水头/扬程为136m/137m,水轮机工况最大出力88MW,转速277r/min;最大的贯流可逆式水泵水轮机(灯泡式)为法国的朗斯(LaRance)潮汐电站,最大出力10MW,最高水头/扬程为11m/6m。中国已投入运行的单级混流式水泵水轮机安装在潘家口抽水蓄能电站,运行水头为36~86m,单机额定出力90MW;广州抽水蓄能电站的水泵水轮机运行水头/扬程范围按合同规定为496~537m/514~550m,单机额定出力306MW,转速500r/min。斜流式水泵水轮机安装在密云抽水蓄能电站,转轮直径2.5m。发电工况时最大水头64m,出力13.5MW;额定水头46m,出力11MW。抽水工况时,最



高扬程 59 m，设计扬程 52 m。

(史毓珍)

shuidian shunlu

水电枢纽 (hydropower complex) 以水力发电为主要任务，由壅(挡)水建筑物(坝、闸、河床式厂房等)、泄水建筑物、引水系统及水电站厂房、变压器场、开关站等组成的综合体。在多泥沙河流上，为了减少水库淤积，防止有害泥沙进入水轮机和淤堵进水口，需设冲沙建筑物，一般在靠近发电进水口处设有冲沙底孔。在通航、漂木河流上设过坝设施(船闸、升船机、过木道等)。在有回游鱼类的河流上设过鱼设施(鱼道、升鱼机等)。导流建筑物是水电枢纽施工临时建筑物(见施工导流)。水电枢纽可以集中水流的发电水头，具有发电、变电、泄洪、蓄水、放水、排沙以及过船、过木、过鱼等功能。根据水资源综合利用要求，水电枢纽可兼顾防洪、灌溉、城镇和工业供水、航运和其他综合利用要求。以抽水蓄能发电为目的的建筑物群也可包括在水电枢纽范畴之内。抽水蓄能电站枢纽有上、下两个水库。抽水发电厂房位于上、下水库之间。上水库和下水库由引水系统连接(见抽水蓄能电站)。

类型 有常规水电站水电枢纽和抽水蓄能电站枢纽两类。前者与坝式、引水式、混合式三种水电站相对应，分为坝式、引水式和混合式3类水电站的枢纽布置形式。抽水蓄能电站枢纽的布置形式，相应发电厂房的布置有地下式、井式、地面式等类型。

枢纽布置原则 水电枢纽的布置要因地制宜，既要满足枢纽的各项任务和功能的要求，又要适合枢纽区的自然条件，便于施工和导流，有利于节省投资和缩短工期，还要注意以下几点。

(1) 在洪水大的河流上要选好泄洪和导流的布置方式，它往往成为确定枢纽布置的重要因素。

(2) 泄水建筑物的布置既要使其有足够的泄水能力，还要有利于上、下游泄洪水流与河道中水流的衔接，能够妥善解决下泄水流的消能、防冲、防淤等问题，避免对岸坡和其他建筑物的安全和运行造成不利影响。混凝土坝枢纽泄水建筑物宜尽量布置在河床部位

内，只有当岸边有布置泄水建筑物的良好条件，或采用轻型混凝土坝，坝身不能大量泄洪时，才将主要泄水建筑物布置在岸边。土石坝枢纽宜尽可能以岸边溢洪道为主要泄洪设施。在高山峡谷开挖岸边溢洪道工程量过大，或可能引起较难处理的高边坡稳定问题时，也可采用隧洞为主要泄水建筑物。土石坝-混凝土坝混合枢纽一般将泄水建筑物布置在河床混凝土坝段。

(3) 水电站厂房宜布置在对外交通和出线方便的地方。有混凝土坝的枢纽，水电站厂房边宜布置在河床混凝土坝段。当河床没有足够的位置，或为了克服施工干扰和导流的困难，以及为了利用河道水头等目的，也可采用岸边或地下厂房。

(4) 导流建筑物要与永久水工建筑物相协调，并尽可能加以利用，将其改建为枢纽永久建筑物。枢纽永久建筑物的布置也要尽量结合施工导流和渡汛的需要。

(5) 过坝设施布置在对上、下游航道和停泊区有利的一岸，并尽量与水电站厂房分开布置，避免在运行中相互干扰。

(6) 冲沙建筑物的布置要能冲走发电进水口前的淤沙，尽量减少泥沙进入水轮机。

对汛期多泥沙河流，为了减少水库淤积，泄水建筑物的布置应能保持水库在汛期低水位运行，遇一定标准的洪水而不壅高水库汛期运行低水位。

(7) 水电枢纽各组成建筑物有时可以相互结合利用或重叠布置，例如一洞(孔)多用，兼做泄洪、导流、放水、冲沙、发电引水或尾水等项中的几项，泄水建筑物与水电站厂房重叠布置等。这种布置可以克服因坝址狭窄，布置水工建筑物前缘不足的困难，并可节省工程量。缺点是导流、渡汛比较复杂，施工干扰较大。

坝式水电站水电枢纽 按坝型分为混凝土坝(砌石坝)枢纽、土石坝枢纽和土石坝-混凝土坝混合枢纽三类。坝式水电站水电枢纽的建筑物一般集中在坝址处。

(1) 混凝土坝(砌石坝)枢纽。其特点是可利用坝身泄洪和布设发电进水口、冲沙孔等建筑物。枢纽中泄水建筑物和水电站厂房的位置和型式有不同的组合。中国工程实例中常见的位置和型式的组合见下表。

混凝土坝枢纽中泄水建筑物和厂房位置和型式组合表

序号	主要泄洪建筑物		主要发电厂房		一般适应条件	工程举例
	位置	型式	位置	型式		
1	河床	坝身泄洪	河床	坝后厂房	河谷较宽的坝址	丰满水电站
2	河床	坝身泄洪	河床	坝内厂房	洪水较大，坝址河谷较窄	凤滩水电站
3	河床	坝身泄洪	河床	厂顶溢流厂房	洪水较大，坝址河谷较窄	新安江水电站
4	河床	坝身泄洪	河床	河床式厂房	水头较低(一般不超过40 m)，河床较宽	大化水电站

续表

序号	主要泄洪建筑物		主要发电厂房		一般适应条件	工程举例
	位置	型 式	位置	型 式		
5	河床	坝身泄洪	河床	厂前挑流厂房	洪水较大，坝址河谷较窄	乌江渡水电站
6	河床	坝身泄洪	岸边	地面厂房	洪水较大，河床较窄，岸边有合适的地形条件	柘溪水电站
7	河床	坝身泄洪	岸边	地下厂房	洪水较大，河谷较窄，地形、地质条件适于建地下厂房	白山水电站
8	岸边	岸边溢洪道、泄洪隧洞	河床	坝后厂房	坝址河谷较窄，洪水较大，岸边有合适地形	刘家峡水电站
9	岸边	滑雪道式溢洪道	河床	坝后厂房	坝址河谷较窄，洪水不太大，多用于混凝土轻型坝	东江水电站

(2) 土石坝枢纽。可分为顺直河段上的枢纽和弯

曲水电站。土石坝和混凝土坝的连接可采用混凝土翼墙或插入墙插入土石坝的方式。

引水式水电站水电枢纽 包括首部建筑物和厂房区建筑物两部分。一般首部建筑物与厂房区建筑物相距甚远，由引水道（引水隧洞、引水明渠、引水明管）相连。首部建筑物一般包括拦河闸、坝、进水口、冲沙闸、沉沙池等建筑物。有的小型工程不设拦河闸、坝，称为无坝引水式水电站水电枢纽。厂房区建筑物包括调压室（压力前池）、压力管道（隧洞）、水电站厂房、变压器场、开关站、尾水渠（隧洞）等。引水式水电站水电枢纽，按引水道内水流为有压流或明流，分为有压引水式和无压引水式两类。

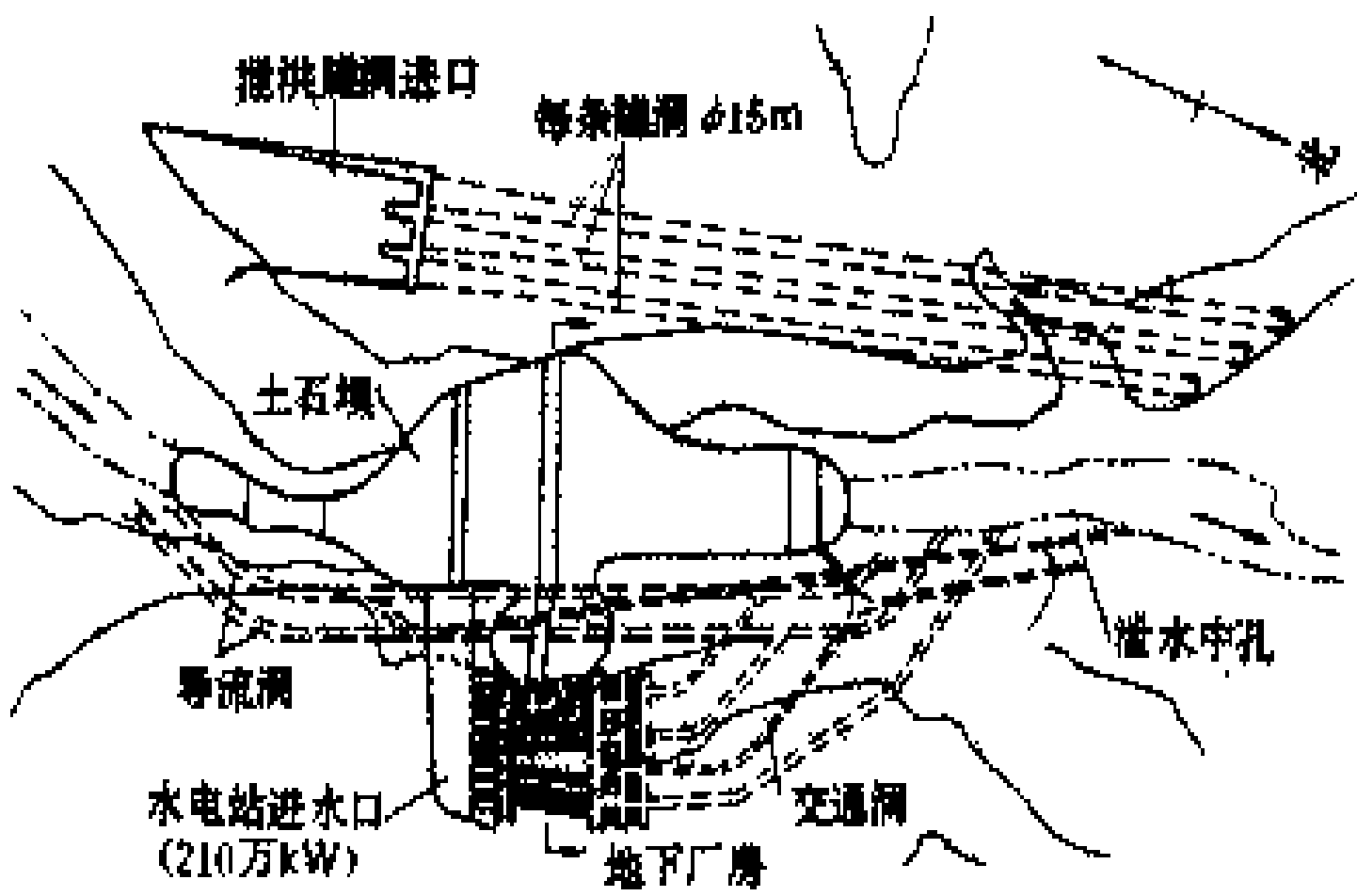


图1 土石坝枢纽（奇科森水电站）

道河段上的枢纽。前者泄水建筑物和水电站厂房等沿岸顺河布置，一般导流、泄水、引水系统等建筑物线路较长，枢纽建筑物布置比较拥挤，在地质条件允许时多采用地下厂房，例如墨西哥的奇科森（Chicoasen）水电枢纽（图1）；后者利用河弯形成的河间地块布置引水发电或泄水、导流建筑物，例如碧口水电枢纽（见碧口水电站）。

(3) 土石坝-混凝土坝混合枢纽。适用于宽河谷坝址。利用河床混凝土坝段布置泄水建筑物、引水系统、水电站厂房等，例如巴西的伊泰

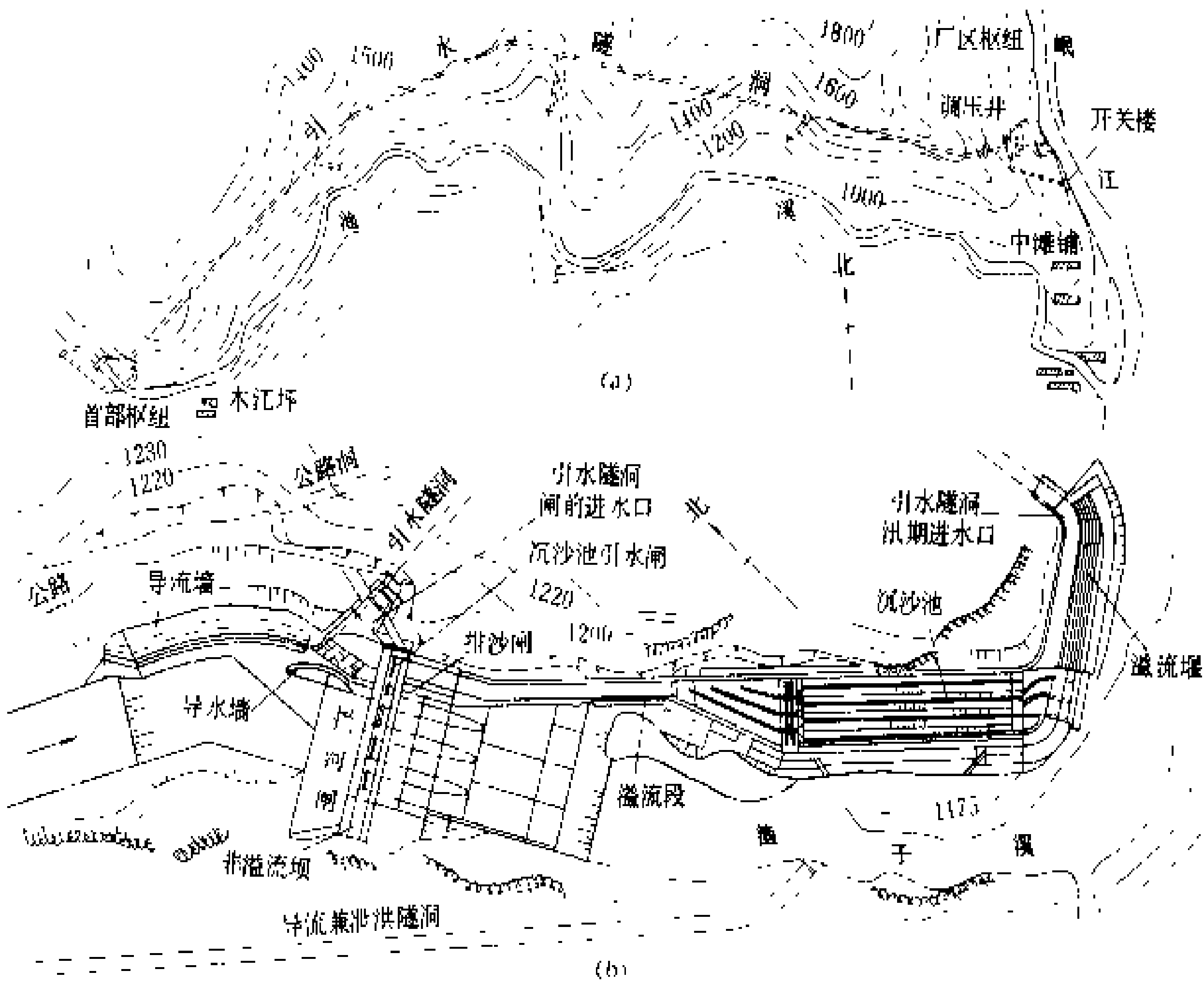


图2 有压引水式水电站枢纽布置（渔子溪一级水电站）

(a) 总体平面布置；(b) 首部建筑物平面布置

(1)有压引水式。引水隧洞(或引水明管)内为有压水流,在它们的末端设调压室,下接压力管道(隧洞)。首部建筑物分为有水库的和无水库的两种。前者多建有较高的拦河坝,不需设沉沙池,进水口附近设有冲沙底孔,例如鲁布革水电站;后者多建拦河闸或低的溢流坝,一般设有沉沙池,进水口附近设有冲沙闸,例如渔子溪一级水电站的首部枢纽(图2)。

(2)无压引水式。引水明渠或引水隧洞内的水流为明流。它们的末端设有压力前池,下接压力管道。首部建有拦河闸或低的溢流坝,进水口一般为开敞式。一般

距不很远,多利用河弯修建引水隧洞取得一定水头。首部建有相对较高的拦河坝,不设沉沙池。例如矶头水电站枢纽(图4)。

抽水蓄能电站枢纽 枢纽建筑物从上游向下游依次是:①上水库;②进(出)水口;③引水道和上游调压室;④压力管道;⑤抽水发电厂房;⑥尾水管道(隧洞)和尾水调压室;出(进)水口;⑦下水库。

上、下水库一般在河流或沟谷筑坝形成。除设有进(出)水口或出(进)水口外,还设有泄水、冲沙等建筑物。当水库以上径流很少时,也可不设泄水、冲沙建筑物。上、下水库需根据地质条件,对坝基、库坡、库底做好防渗;对库坡做好护坡和排水。上游调压室及尾水调压室的设置,根据抽水蓄能电站对水力-机械过渡过程条件的要求确定。

它的布置形式多为地下式(如广州抽水蓄能电站)。除上、下水库设在地面外,整个引水系统及厂房均布置在地下。变压器场及开关站也多布置在变压器洞内。为了防气蚀,抽水蓄能电站机组淹没在水下的深度很大。因此当地质条件适宜时,把厂房布置在地下,常是比较有利的。按厂房在引水系统中的位置(靠近上水库、在中部或靠近下水库),又可分为首部式、中部式、尾部式3种类型。

当地形、地质条件允许时,抽水蓄能电站也可布置在靠近下水库的竖井中或地面上,分别为井式和地面式。

(董育坚)

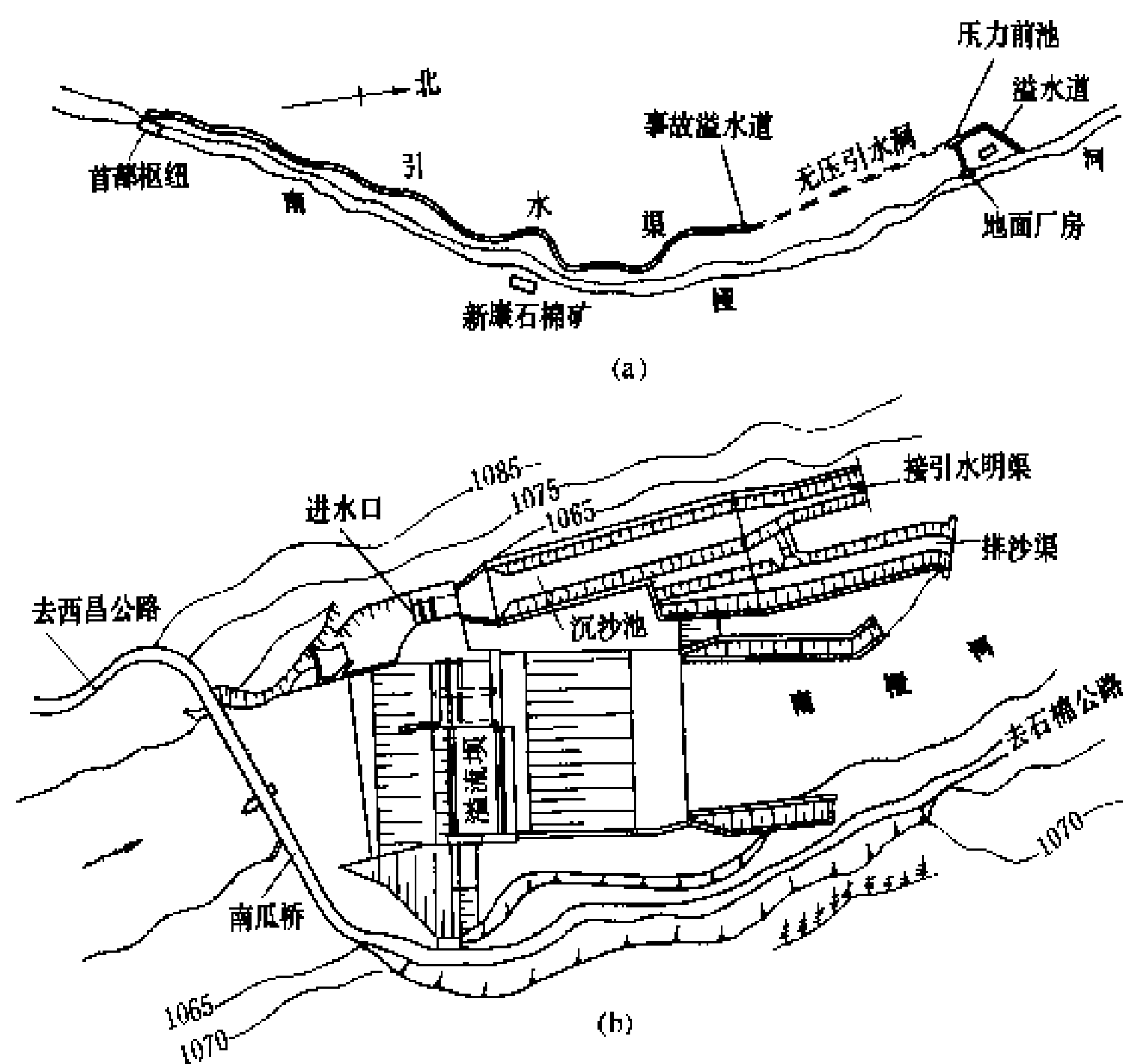


图3 无压引水式水电站枢纽布置(南桡河二级水电站)
(a)总体平面布置;(b)首部建筑物平面布置

设有沉沙池。例如南桡河二级水电枢纽(图3)。小型工程也有无坝引水的。

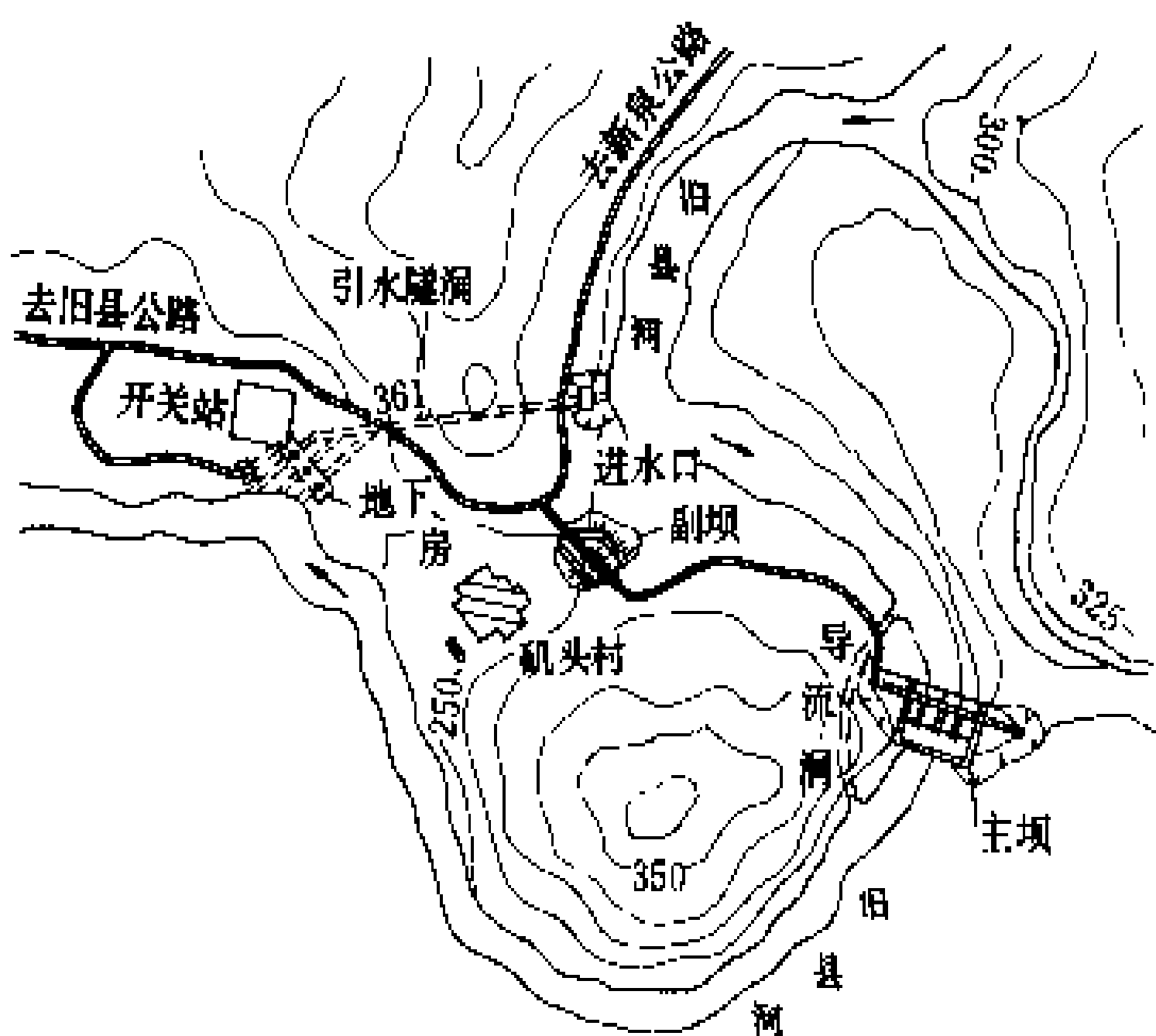


图4 混合式水电站枢纽布置(矶头水电站)

混合式水电站水电枢纽 一般首部与厂房区相

shuidianzhan

水电站 (hydropower station) 把水能转换成电能的工厂,又称水力发电厂或水力发电站。抽水蓄能电站发电工况也是把水能转换成电能,所以也属于水电站范畴。

与火电厂比较,建造在河川上的常规水电站,每kW装机容量的造价虽较高,但系利用水能发电,不需燃料,运行管理费用又低,因而每kW·h的发电成本一般要比其他电源的发电成本为低。常规水电站除向电力系统提供电力、电量外,由于其水轮发电机组起停方便、迅速,只要具有能对径流进行日调节以上的水库,往往是优越的调峰、调频和事故备用电源。在电力系统规模和负荷峰谷差日渐增大的情况下,常规水电站系统中承担调峰、调频、事故备用的作用和对系统安全与经济方面的效益也愈显著。此外,水电站还具有



节约燃料和不污染空气的优点；常规水电站的水库一般还具有综合利用效益（见水力发电）；因此，在工业发达国家的电力工业发展过程中，一般首先着力建设水电站。如在20世纪50年代，不少欧洲国家的电力系统中，由水电站提供的电量比重超过了50%，甚至超过90%。这些国家在水能资源大部分被开发以后，这一比重才逐渐下降。据联合国《世界能源统计年鉴》，1990年世界水电年发电量占总年发电量的比重为18.4%，水电装机容量占总装机容量的比重为22.9%。中国1990年电力总装机容量137890 MW，其中水电装机容量为36045.5 MW，占26.1%；总年发电量6213亿kW·h，其中水电年发电量为1264亿kW·h，占20.3%。

类型 按利用能源的种类，水电站可分为：常规水电站、抽水蓄能电站、潮汐电站和波浪能电站等。

常规水电站 把河川（包括湖泊，地下水）中的水能转换成电能，是当前技术最成熟、开发最多的一种水电站。现在全世界已建成运行的常规水电站总装机容量，约为625500 MW，年发电量约为22700亿kW·h（英国《国际水力发电与坝工建设》杂志据各国1990年前后公布的资料初步统计数）。国际上已建成的规模最大的常规水电站为由巴西和巴拉圭合建的伊泰普（Itaipu）水电站，其装机容量为12600 MW。中国已建常规水电站中装机规模最大的是长江干流上的葛洲坝水利枢纽的水电站，其装机容量为2715 MW；在建的是在雅砻江上的二滩水电站，装机3300 MW；和长江干流上三峡水利枢纽的水电站，其装机容量初选为18200 MW。

抽水蓄能电站 利用电力系统内在负荷低谷时的多余电量将低处水库（又称下池或下库）内的水抽蓄到高处水库（又称上池或上库）内，在负荷高峰时从高处水库引水发电将水排入低处水库的水电站。到1991年止，全世界已建成的抽水蓄能电站总装机容量为83561 MW，其中单站规模最大的为美国巴斯康蒂（Bath County）抽水蓄能电站，装机容量2100 MW。中国在建的广州抽水蓄能电站，装机容量为2400 MW。

潮汐电站 把潮汐能转换成电能的水电站。一般在海湾或河口修筑堤坝建成水库，于涨潮时放海水入库，利用库水位低于潮位的水位差发电；待潮位下降，又利用库水位高于潮位的水位差和库内蓄存的水量发电。法国朗斯（La Rance）潮汐电站是世界已建成潮汐电站中规模最大的水电站，其装机容量为240 MW。

波浪能电站 把海洋的波浪能转换成电能的水电站。此种水电站目前尚处于试验阶段，还未建成有一定工业规模的电站。

常规水电站还可按水头集中方式、水库调节性能

和装机规模的区别进行分类。

按水头集中的方式可分为坝式水电站、引水式水电站和混合式水电站（见引水式水电站）。

按水库调节径流的能力可分为多年调节水电站、年调节水电站、季调节水电站、周调节水电站、日调节水电站（见径流调节）和不调节径流的径流式水电站等。

按单站装机容量的规模分类，世界各国尚没有统一的划分标准。中国现行的划分标准为：单站装机容量250 MW及以上为大型，其中大于750 MW的为大型1型，750~250 MW为大型2型；250 MW以下至25 MW为中型；小于25 MW为小型，其中小于25~0.5 MW为小型1型，小于0.5 MW为小型2型。

组成 水电站主要由挡水建筑物、泄水建筑物、排沙设施、发电引水系统、发电系统以及其他引水设施和过坝设施等组成。

挡水建筑物 拦河修建的坝、闸或河床式水电站的厂房。挡水建筑物的作用为壅高上游水位，集中水头用以发电并形成水库以调节径流。拦河坝一般分为土石坝和混凝土坝两大类型，据坝址的地形地质条件及建坝材料的来源等因素，经技术经济比较后选用。当壅水不高而需较大的泄洪流量时，可用闸挡水。闸由闸墩和闸门组成，既是挡水建筑物，又是泄水建筑物。当壅水不高而河床比较开阔时，也可把水电站厂房作为挡水建筑物的组成部分，成为河床式水电站。

泄水建筑物 其主要作用为泄放洪水出库以保证坝的安全和控制出库下泄流量以满足下游的防洪要求。泄水建筑物有时还可用以泄放下游灌溉、工业、生活等要求的用水，或用以放低水库水位，或兼作为排沙、施工导流的设施。泄水建筑物有溢洪道、泄洪隧洞、泄水闸和坝身泄水孔等型式，根据泄放水要求结合坝型和地形条件进行选择。

排沙设施 其主要作用有：①排沙出库以保持水库的调节库容。②排泄厂房或坝上游附近的淤沙以减少泥沙进入水轮机或泄水孔，减轻泥沙磨损。排沙设施有排沙孔和冲沙闸等类型，根据排沙要求结合枢纽布置进行选择。

发电引水系统 把发电用水从电站上游河道或水库引入厂房，经过水轮机，用以发电后再从厂房排入下游河道或下级水库（见主厂房机电设备布置）。坝式水电站的发电引水系统比较简单，仅由进水口、压力管道、尾水管和相应的闸、阀与启闭设备组成；引水式水电站和混合式水电站的发电引水系统比较复杂，包括有进水口、引水隧洞（或引水明管、引水明渠）、调压室（或井）或压力前池、压力管道、尾水管或尾水隧洞（或尾水明渠）等建筑物以及相应的闸、阀和启闭设备等。



发电系统是水电站的核心,包括有主厂房、副厂房、变电站、开关站、中央控制室;安装有发电设备、生产辅助设备、变电设备、高压电器设备、控制保护设备和厂用电设备等。

水轮发电机组是发电的主要设备,由水轮机和水轮发电机组成。利用水流的压力或流速水头推动水轮机,水轮机再带动水轮发电机发电。水轮发电机组的主要附属设备有进口阀、水轮机调速器、油压装置、水轮发电机励磁、冷却系统(见水轮发电机空气冷却、水轮发电机水内冷和水轮发电机氟里昂内冷)和起重设备。所有这些设备都安装在厂房内(见水电站厂房)。

主变压器把水轮发电机电压升高到高压或超高压,以便远距离输电。设置变压器的变电站位置一般靠近主厂房,结合考虑水电站的开发方式和地形地质条件选定(见主变压器布置)。

高压电器设备包括断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、阻波器和母线系统等。这些设备一般都布置在开关站内。开关站一般布置在离厂房不远的地方。

其他引水设施 为满足灌溉、工业或生活用水需要而设置的从水库引水的设施。一般在水库岸边或通过坝体修建取水口引水。在取水口下游一般要考虑设置消能设施,使水流能平稳地沿输水渠道或管道流送到需水地点。

过坝设施 为船舶、木、竹、鱼类过坝而设置的设施。过船设施有船闸或升船机;过木、竹设施有过木、竹机或筏道;过鱼设施有鱼梯、鱼道或集鱼船等。

在电力系统中的作用 水电站同时向所在电力系统提供电力和电量。不具有调节径流能力的径流式水电站,往往以提供电量为主;具有调节水库的常规水电站,一般以提供电力为主,并在系统中承担主要的调峰、调频和事故备用任务。在水能资源丰富、开发条件优良、水电站装机容量比重大的国家(如加拿大、巴西、挪威)的水电站,一般以提供电量为主;在工业发达、系统规模大、火电站装机容量比重大的国家或系统内的水电站,除提供电量外主要提供调峰、调频和事故备用容量。在后一种系统内,可开发利用的水能资源大部分被开发以后,水电站装机容量所占比重将逐渐下降,调峰、调频和事故备用容量不足的问题逐渐突出,于是对已建的具有调节水库的水电站,在条件许可的情况下多先后采取扩大装机容量的工程措施,或另修建抽水蓄能电站,以解决调峰、调频和事故备用容量不足的问题。如美国于1941年已建成大古力(Grand Coulee)水电站,原装机1974 MW,80年代扩建后增大到6494 MW,计划还将扩大到10830 MW;不少国家已修建了许多抽水蓄能电站。中国的华北、华东、华

南地区,电力系统规模大,区内水能资源的开发利用率较高,都已着手考虑扩建某些已建水电站和修建抽水蓄能电站,如丰满水电站正在扩建,装机容量由554 MW扩大到1100 MW,广东省的广州抽水蓄能电站已开始发电,北京的十三陵抽水蓄能电站正在施工。

(马君寿)

shuidianzhan caiwu fenxi

水电站财务分析 (financial analysis of hydropower station)

根据现行财税制度和价格,判别水电建设项目财务上可行性的评价方法。财务分析的内容包括建设资金筹措、实际收入和支出计算、评价指标计算、贷款偿还能力的计算分析以及敏感度分析。

建设资金筹措 水电工程项目资金来源有银行贷款、地方集资、发行电力建设债券、业主自有资金以及国外贷款等。拟定几个筹资方案,对各种资金方案的贷款利率及还款条件进行比较选择、确定。

支出与收入 支出包括固定资产投资、年运行费及税金三部分。固定资产投资采用工程预(概)算成果。年运行费用为电站正常运行应支付的费用,包括大修费、工资、材料费、库区维护基金等(见水电站生产成本)。税金,据国家规定的税类和税率交纳,世界各国各有差别,中国现行规定,税金包括产品税、地方税(城市维护费和教育费附加)和所得税等。

收入为发电销售收入,与电站核算制度有关。实行电力系统统一核算的电站,为售电量乘售电价。实行独立核算的电站为厂供电量乘上网电价。在设计阶段多以后者计算发电收入。由于兴建本电站对已建和在建水电站增产的电量价值,要根据实际情况考虑能否纳入本电站。

评价指标 它包括财务内部收益率、投资回收期、财务净现值、投资利润率和投资利税率等。

(1) 财务内部收益率(Finacial Internal Rate of Return, FIRR)的计算方法与经济分析相同(见水电站经济分析)。

(2) 投资回收期是水电站的净收益抵偿全部投资(包括固定资产投资和流动资金)所需的时间,其表达式为

$$\sum_{t=1}^{P_i} (C_i - C_o)_t = 0$$

式中 P_i 为投资回收期; C_i 为现金流入量(即每年的收入); C_o 为现金流出量(即每年的支出); $(C_i - C_o)_t$ 为第 t 年的净现金流入量(即净收入)。

(3) 财务净现值(financial net present value, FNPV)反映电站在计算期内获利能力的动态指标,其

表达式为

$$FNPV = \sum_{t=1}^n (C_t - C_0) (1 + i_0)^{-t}$$

式中 n 为计算期, a ; i_0 为电力工业基准收益率 (中国目前暂用 12%)。

(4) 投资利润率是项目达到设计生产能力后的一个正常生产年份的年利润总额与总投资的比率, 按下式计算

$$\text{投资利润率}(\%) = \frac{\text{年利润总额 (或年平均利润总额)}}{\text{总投资}} \times 100$$

年利润总额 = 年销售收入 - 年总成本 - 年销售税金 - 年技术转让费 - 年其他净支出

总投资 = 固定资产投资 + 建设期利息 + 流动资金

(5) 投资利税率是项目达到设计生产能力后的一个正常年份的年利税总额与总投资的比率, 按下式计算

$$\text{投资利税率}(\%) = \frac{\text{年利税总额 (或年平均利税总额)}}{\text{总投资}} \times 100$$

年利税总额 = 年销售收入 - 年总成本 - 其他净支出

投资利润率与利税率大于国家规定的项目, 财务上是可行的。

贷款偿还能力分析 贷款偿还期是项目财务可行性的一个重要判别指标, 它是指在国家财政规定及项目具体财务条件下, 电站投产后偿还贷款本金和利息的时间。其表达式为

$$I_d = \sum_{t=1}^{P_d} (R_p + D' + D'' + R_0 - R_c)_t$$

式中 I_d 为固定资产投资借款本息之和; P_d 为借款偿还期 (建设开始年计算); R_p 为年可用以还贷的发电利润; D' 为年可用以还贷的折旧; D'' 为年可用以还贷的税金; R_0 为年可用于偿还借款的其他收益; R_c 为还款期的年企业留成。以上各项均按国家现行规定计算。

按中国人民银行的规定 (1989 年 9 月 21 日起施行), 小型项目还贷期限最长不得超过 6 年, 大中型项目不得超过 12 年, 特大项目不得超过 15 年。以上年份均指从支用第一笔贷款之日起计算。

敏感性分析 敏感性分析与经济分析相同 (见水电站经济分析)。

(欧阳华) (a) 河床式; (b) 坝后式; (c) 岸边式; (d) 坝内式; (e) 溢流式; (f) 地下式

shuidianzhan changfang

水电站厂房 (power house of hydropower station)

装置水轮发电机组及其他附属机电设备和辅助生产设施的建筑物。通常由主厂房和副厂房组成, 但小型水电站也有的不设副厂房。主厂房又分主机间和安装间。主机间装置水轮机、发电机及其附属设备, 安装间是机组安装和检修时, 摆放、组装和修理主要部件的场地。副厂房包括专门布置各种电气控制设备、配电装置、电厂公用设施的车间以及生产管理工作间。主厂房、副厂房连同附近的其他构筑物及设施, 统称厂区, 是水电站运行、管理中心。

类型 按厂房结构及布置特点分为地面式厂房、地下式厂房、坝内式厂房和溢流式厂房。地面式厂房, 厂房建于地面, 按其位置不同, 又分为河床式厂房、坝后式厂房、岸边式厂房; 地下式厂房, 厂房位于地下洞室中, 也有的地下厂房其上部露出地面; 坝内式厂房, 厂房位于坝体空腔内; 溢流式厂房, 厂房位于溢流坝坝趾, 坝上溢出水流流经或跃过厂房顶, 泄入尾水渠。厂房内装置的水轮发电机组的型式, 按水电站的水头大小等因素确定。水电站厂房型式如图 1。

几种常见的水电站厂房的布置: ①装置立轴式和横轴式冲击式水轮机的地下式厂房 (图 2), 水流由压力引水钢管引进厂房, 经针阀调控, 由喷嘴射出冲动水斗, 使机组转动发电, 水束离开水斗后自由落入尾水槽, 然后泄入尾水洞。针阀前的球阀安装在主厂房内或主厂房外的阀室内, 水轮机叶轮必须安装在最高尾水位以上, 保证转动时不受尾水槽中水面所阻, 主机间上层设有桥式起重机, 供机组安装及检修使用。②装置立式混流式水轮机的岸边式厂房 (图 3), 水流由压力管道引进厂房, 经水轮机的蜗壳, 推动转轮后由尾水管泄

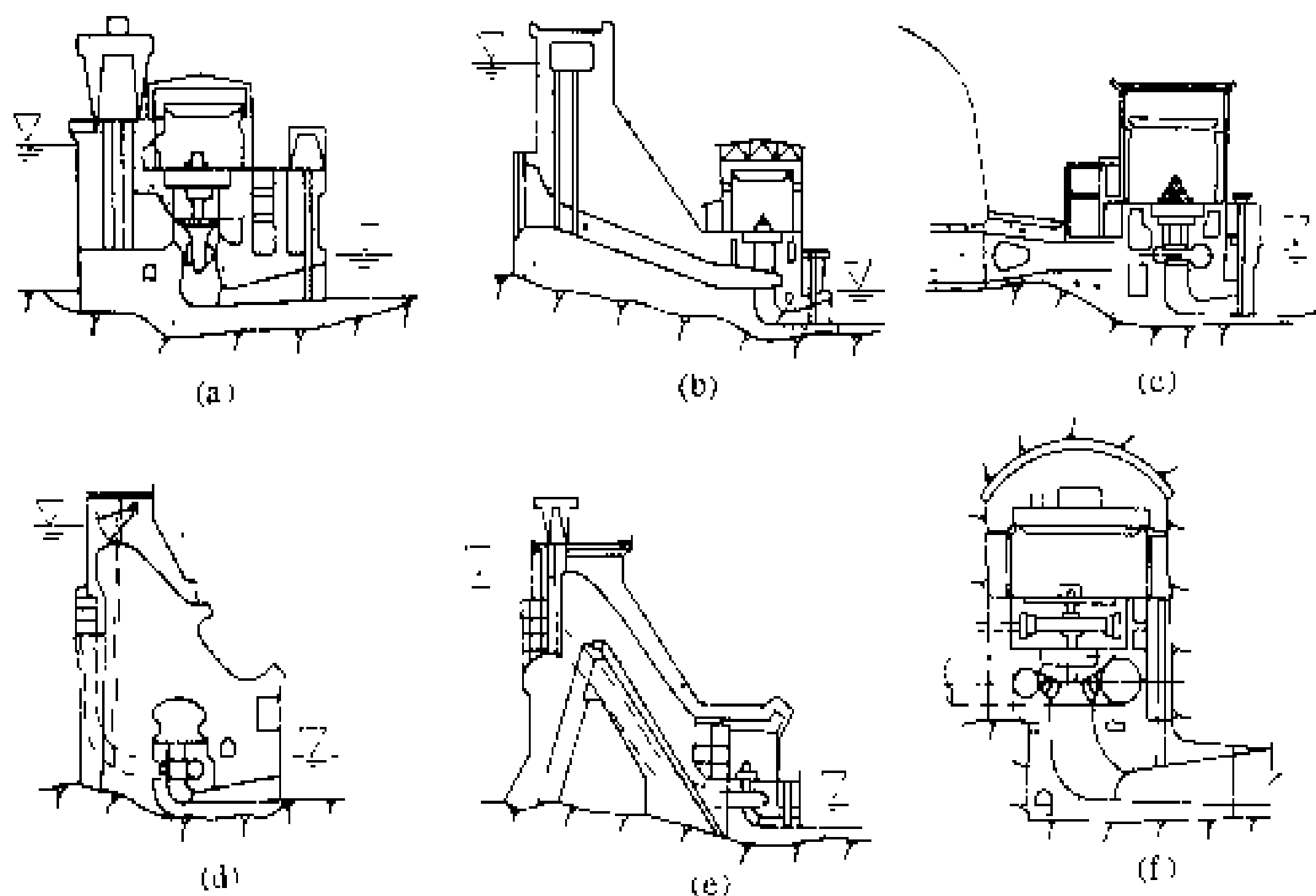


图 1 水电站厂房型式

入尾水渠。蜗壳上游压力管道上装设有供机组发生事故或检修时快速截断水流用的蝴蝶阀(或球阀、平面闸

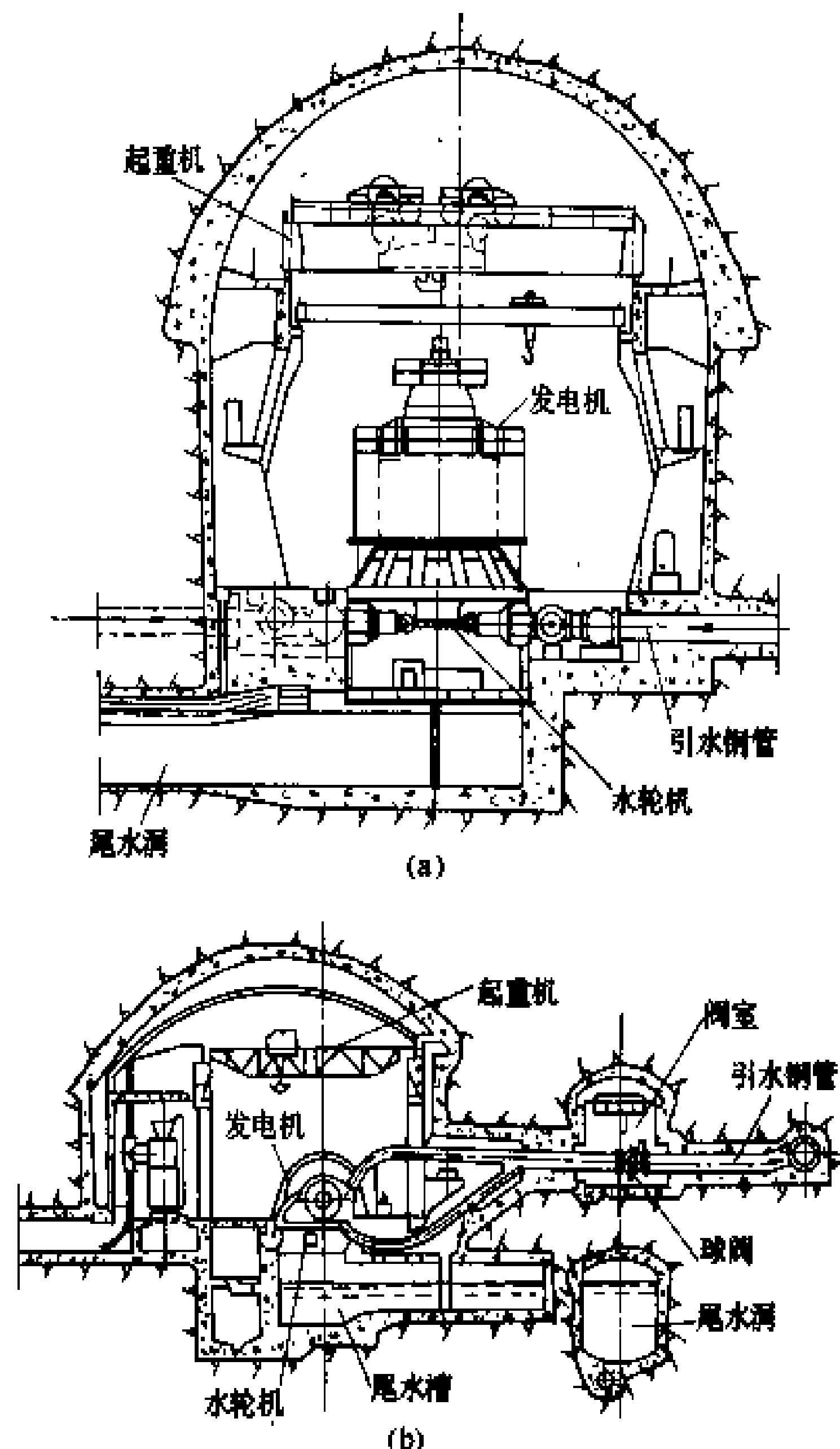


图2 冲击式水轮机地下式厂房横剖面
(a) 立轴式机组; (b) 横轴式机组

阀)。若引水压力管道不长且为单机单管,可仅在进水口、压力前池或调压室建筑物上装设可快速关闭的闸

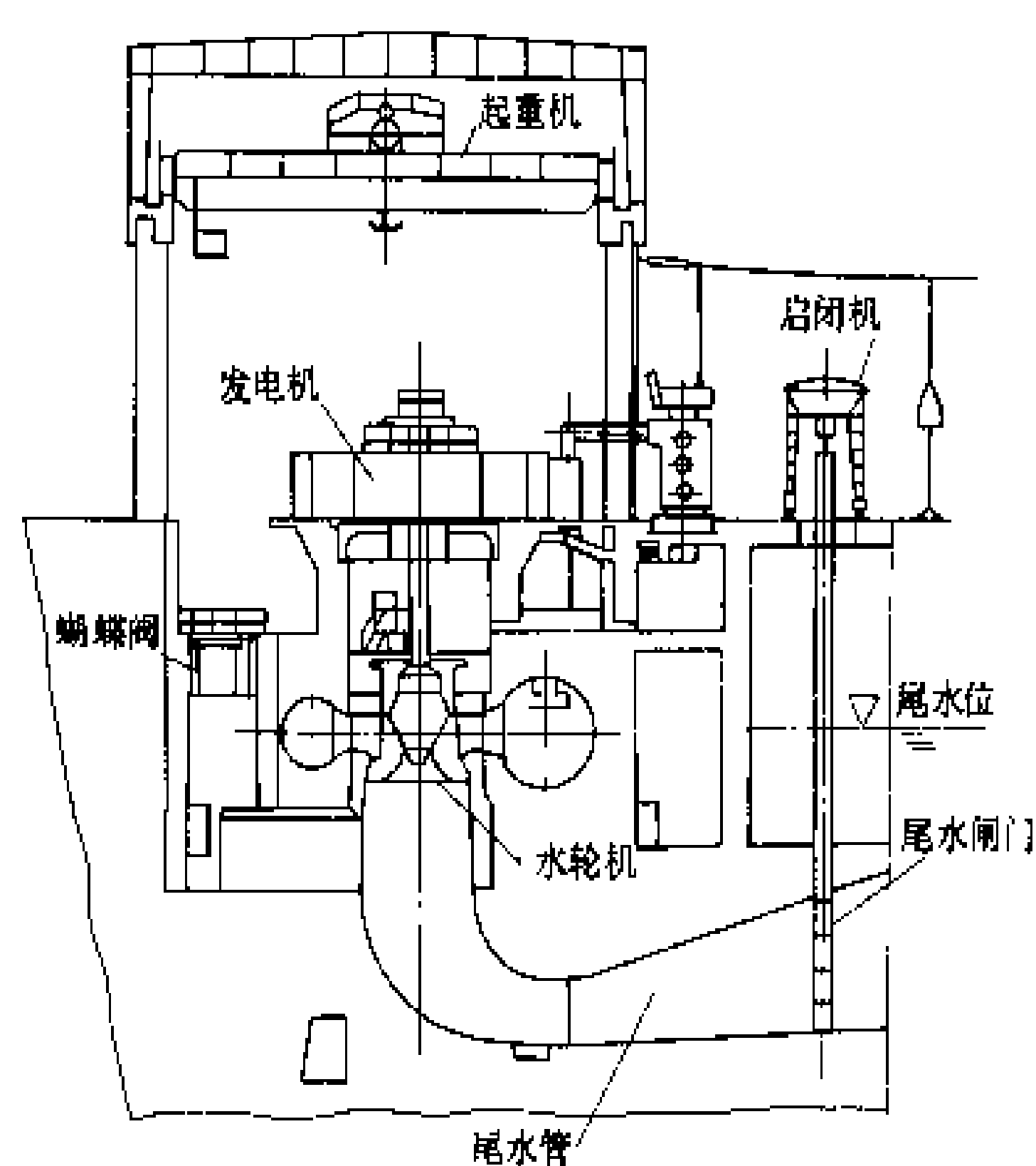


图3 立轴混流式水轮机岸边式厂房横剖面

门。尾水管出口设有尾水闸门及其启闭机械,用于机组检修时截断下游水流,防止倒灌。主机间上部装有桥式起重机,供吊装机组部件及附属设备之用。③装置立轴轴流式水轮机的河床式厂房(图4),过流部分由进水

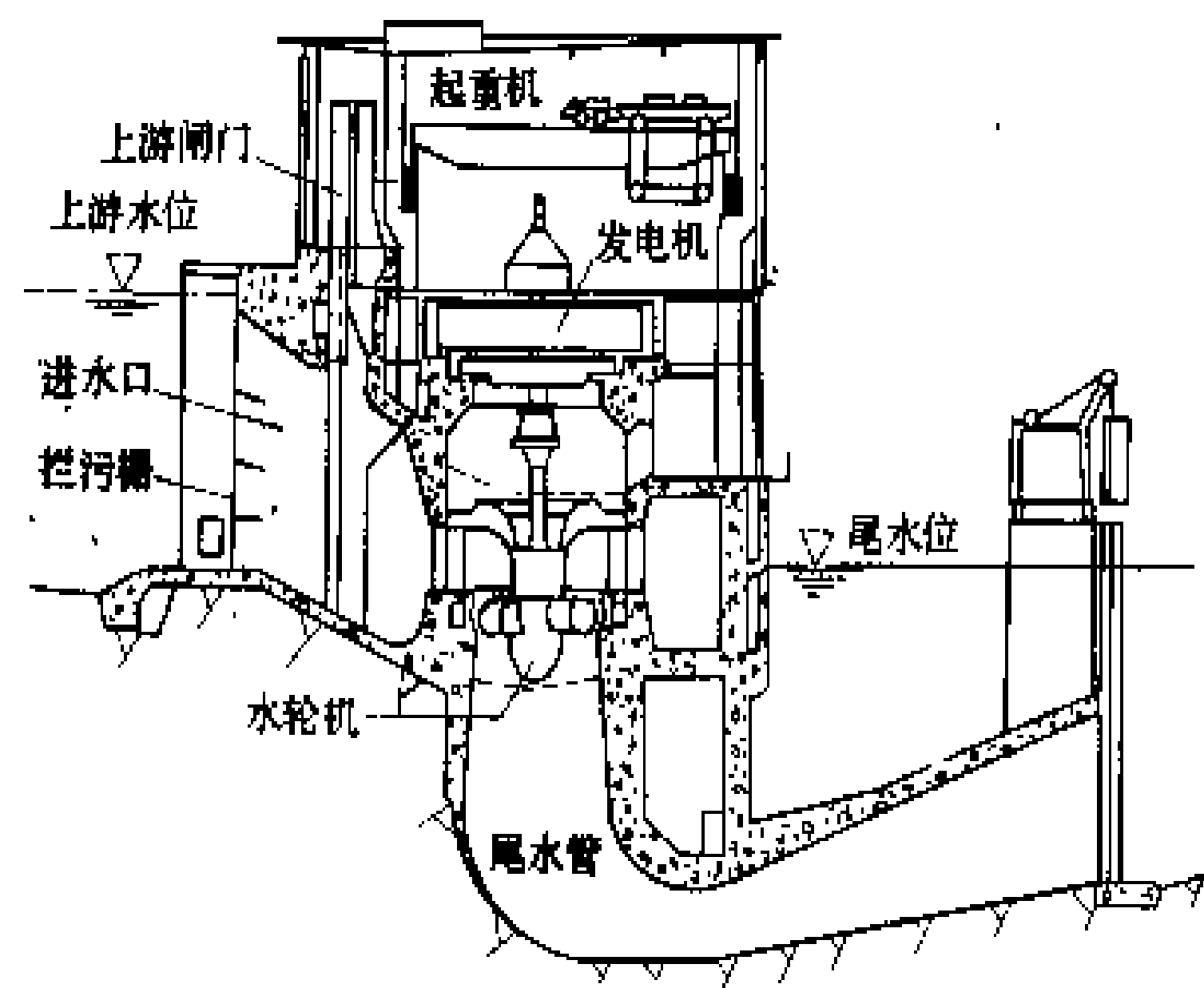


图4 立轴轴流式水轮机河床式厂房横剖面

口、蜗壳及尾水管所组成,其他布置类似立轴混流式水轮机的厂房。④装置灯泡贯流式机组的厂房(图5),水轮机为轴流式,发电机装设在灯泡形的金属壳体内,通过中心轴与水轮机连接,整个机组安装在一个卧式管状结构物中,分为三段:由进口至灯泡首部为进口段,其作用是将水流顺利引入水轮机,装置有拦污栅、上游闸门;由灯泡首部至水轮机转轮叶片中心为机身段,装置有发电机、座环导水机构、水轮机转轮等,机组重量与水推力通过座环和发电机支柱固定于外围混凝土中;由水轮机转轮叶片中心至出口为尾水管段,出口装

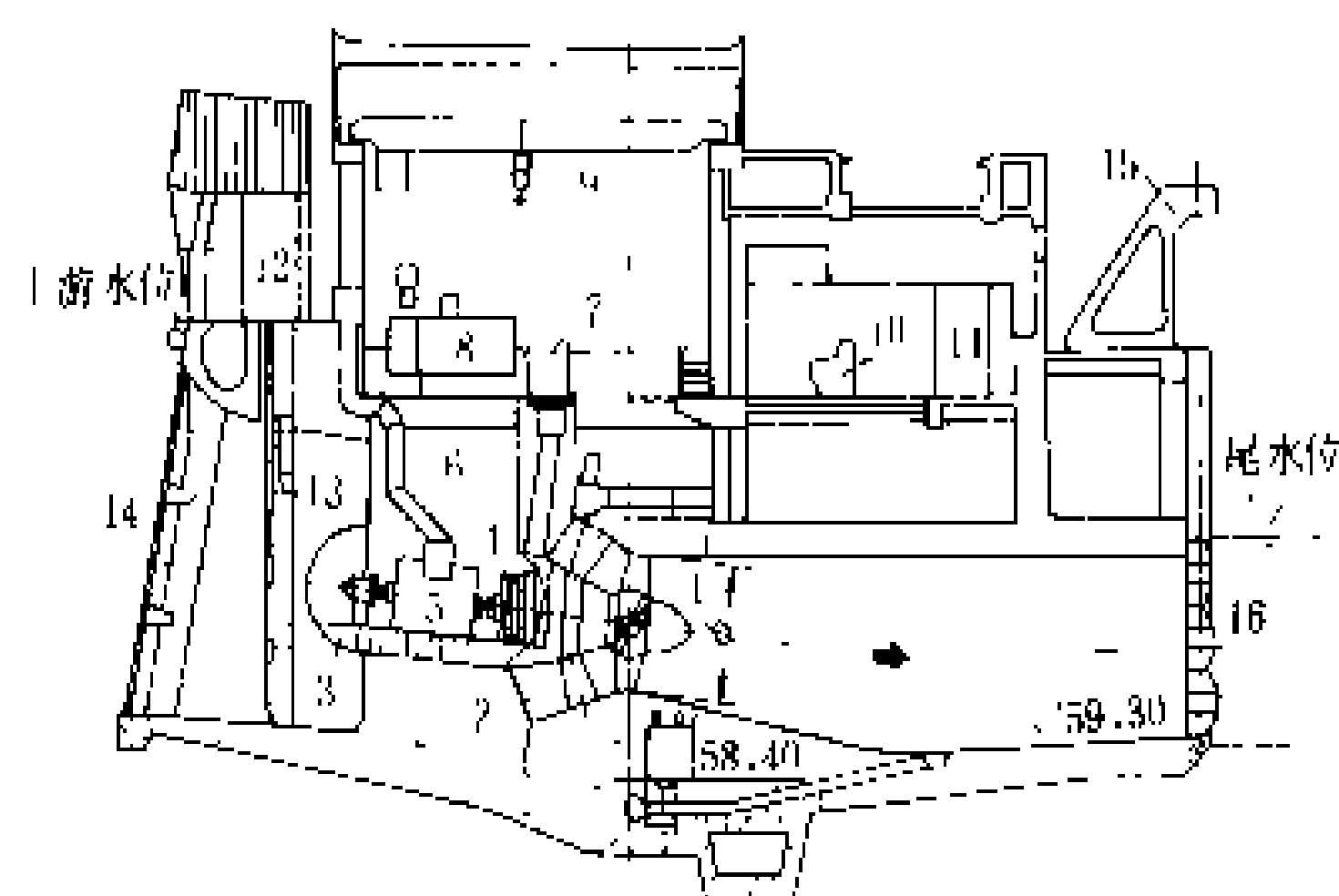


图5 灯泡贯流式水轮机厂房横剖面

1—转轮;2—导叶;3—灯泡外壳;4—加速齿轮系统;5—发电机;6—进入孔;7—调速器;8—变压器;9—桥式起重机;10—操作台;11—配电盘;12—清污机;13—上游闸门;14—拦污栅;15—尾水检修闸门吊架;16—尾水检修闸门

置有尾水闸门。机组检修时,可将灯泡体拆开,使用主机间上层移动式起重机将各部件吊运到安装间修理。



厂房设计 依据水电站开发方式,水轮发电机组型式,所在地址的地形、工程地质、水文、气象等条件,经过技术经济比较后选择合理布置及型式。大中型水电站一般需满足以下各项要求。①使水流顺畅引入机组,并安全泄入下游河道,且水流能量损失小,引水及泄水道的尺寸体形符合水力学原理。②厂房各部分空间尺寸组合应满足机组及其他机电设备的安全运行及检修和安装需要。③建筑物及机电设备的防水淹、防泥沙淤堵、防磨蚀、防火、防爆、防冻、通风、防潮、防酸、防尘、防虫、防雷、抗震等要根据水电站具体情况采取相应措施,以保证厂房正常运行和安全。④提供运行、检修、生产管理人员工作和休息所必需的场所和设施,如卫生、采光、照明、空调、采暖、电梯等。⑤建筑物在使用期内(如50~100年)具备足够的耐久性和安全可靠度,遇特殊情况(如遭受特大洪水、强烈地震等),受到损坏后经过短期修理即可恢复发电。⑥水电站所在地常常是参观旅游场所,厂房的建筑造型、装修和环境能给人们美的感受。⑦布置合理,工程投资省。

厂区 包含主厂房、副厂房、主变压器场、开关站、连接厂房的引水道、尾水道、进厂交通线及厂前区等所构成的区域,是水电站运行和管理中心。厂区各建筑物相互关系要协调,使得水电站运行安全和管理方便,并符合经济原则。地面厂房常将主变压器场布置在厂坝间、厂房尾水平台、厂房端部等场地,地下式厂房主变压器布置在地下或者地面。高压配电装置,需要占用的空间尺寸较大,多采用户外式开关站布置,然而近代电气技术的进步,国内外,地下式厂房及地面式厂房已越来越多采用由气体绝缘金属封闭组合电器组成的户内式开关站布置。

(李必如)

shuidianzhan changnei jingji yunxing

水电站厂内经济运行 (optimal economic operation of hydropower station) 在电力系统调度对水电站确定的发电要求下,使水电站耗水量和附加费用最少的运行方式。它是通过水电站的水轮发电机组最优组合和机组之间负荷最优分配实现的。电力系统调度对水电站的发电要求有水电厂调频、联络线负荷控制、按日负荷曲线运行等。厂内经济运行的核心是优化数学模型和其可以实时控制的软件,并通过水电站计算机监控系统实现。厂内经济运行的依据,除电力系统调度的发电要求外,还需水电站和机组各种参数的实时检测。这些参数包括上下游水位、发电用水量、发电机功率、电压、电流、功率因数等。除发电用水量外,其余参数实测并不困难。对于流量的实

时测量,世界上只有为数很少的水电站设有此等准确测量设备。中国在个别机组上作实时测量试验,未在水电站普遍应用,常用的替代法是利用定期率定的机组效率特性曲线。实践得知,实现厂内经济运行后,约可增加水电站总发电量1%。

厂内经济运行的优化准则是:在规定的总出力下,使运行机组耗水量最小。对于总发电功率

$$P = (A_1, A_2, \dots, A_i \dots A_N) \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 P 为要求的总出力, MW; A_i 为第 i 台机组的运行状态常数,运行机组为1,停运机组为0; P_i 为第 i 台机组功率, MW。

满足约束条件

$$P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max}$$

式中 $P_{i \min}$ 为第 i 台机组功率下限, MW; $P_{i \max}$ 为第 i 台机组功率上限, MW。

达到优化目标

$$Q^* = \min[Q(P, H)] \\ P \in F$$

式中 F 为由约束条件构成的可行域; H 为水头, m; $Q(P, H)$ 为总发电流量, m^3/s ; Q^* 为优化目标函数, m^3/s 。

优化的数学模型分为两类,其一是最优功率分配,另一是在机组优化组合下的最优功率分配。前者是在机组组合已确定的条件下($A_1 \dots A_N$ 已确定)机组间负荷分配数学模型,后者则包括机组台数和机组台号最优组合下的负荷最优分配。多机组水电站,机组最优组合节能效益显著,因而厂内经济运行的有效模型是后者。

优化的数学模型,从初期简单的等功率分配法、运行特性图解法、等微增率法,逐步发展为计算复杂的分支界限法、方向搜索法、动态规划法。

其中分支界限法的原理是:保留运行效率高的机组;平均分配机组间功率。此法在优化过程中把机组台数、台号的组合和负荷分配二者分割起来处理,在理论和方法上存在缺陷,故最后解不一定是最优。方向搜索法是有条件地将机组工作特性分为三个区。运行在第一区增加机组台数使总效率降低;运行在第二区增加机组台数,总效率可能降低也可能增加;运行在第三区增加台数使总效率增加。以此确定增减机组的方向。这种方法降低了求解维数,缩短了计算时间,但求得的是局部最优。各种数学模型中应用较普遍的是等功率分

配法、等微增率法、动态规划法、运行特性曲线图解法。而在水电站由于机组特性曲线与火电厂不同,不适合应用等微增率法。

等功率分配法 对于同型同容量的机组,在机组组合已确定的情况下,以各机组等功率分配为最优。中国的龙羊峡、石泉、石塘等水电站采用此法。如果水电站机组容量不同,采用按机组容量比例分配,是这种方法的扩展。美国大古力水电站采用了这种扩展方法。以等功率分配作为基础,对于同型号等容量的机组,可采用运行特性曲线图解法实现机组最优组合。对于机组特性和容量相同的水电站,常能达到总耗用流量最小。曾有不少电站采用。

等微增率法 等耗量微增率准则,用于发电厂各机组之间负荷分配,当各机组耗量函数 $Q=f(P)$ 为凸函数时,可以使电站总耗水量为最小而负荷达到最优分配。采用此法,先检查各机组耗量函数为凸性,然后作出各种水头下的微增率曲线,存入计算机的数据库,各种水头下每一个微增率值 b_i ,对应各机组的功率值为 $P_1, P_2, P_3 \dots P_N$ 。机组负荷分配的求优过程,是使总出力 $P = \sum_{i=1}^N A_i P_i$,若不相等则增加或减少 b_i 值,可以得到另一组功率值,使其相等。求优过程简单迅速。在火力发电厂应用较多。水电站机组负荷变动范围大,不少水轮发电机组在一部分水头和运行区域其耗量函数 $Q=f(P)$ 为凹函数,或 $db/dP \approx 0$ 即同一 b 值下对应多个功率值使分配不稳定。因此水电站应用较少。

动态规划法 动态规划是 R. 贝尔曼 (R. Bellman) 20 世纪 50 年代研究多阶段决策过程提出的,其中心思想是“在多段决定过程中不论其过去的状态和决策如何,对前面的决策所形成的状态而言,余下的诸决策必须构成最优策略”。它已在各种领域应用。厂内经济运行,寻求最优解,应该对所有可行的机组组合和负荷分配,逐个进行比较,求出其耗水量最低的机组组合与负荷分配,采用枚举法逐一优选,需从数以亿计的决策中寻求。采用动态规划法原理,在每一阶段舍弃绝大多数非最优决策,余下的诸决策是构成机组最优组合和负荷分配所必需的,则可以用最少的比较次数,获得同样的结果,效率提高千、万倍以上。动态规划法可以用于机组最优组合或负荷最优分配,也可以两者结合。此法不受水轮发电机组特性曲线形状限制,理论上严谨,计算量大,必需采用计算机,苏联曾采用此法求出最优解,以检验其他优化方法得到的结果与最优解之间差距。

厂内经济运行,是静态最优化过程,把整个求优计算分解成若干部分,使其等效于一个多阶段决策过程,

充分发挥动态规划法求优的效率。为了直观,决策变量 d_k 设定为机组分配的功率 P_k (k 是指第 k 台机组,对应第 k 阶段)。设初始状态 S_1 为电站总出力,则

$$\begin{cases} S_1 = P \\ d_1 = P_1 \\ S_2 = S_1 - d_1 \\ d_2 = P_2 \\ S_3 = S_2 - d_2 \\ d_3 = P_3 \end{cases}$$

状态转移方程为

$$S_{k+1} = S_k - d_k$$

它的递推关系由此得出。对于第 k 阶段允许决策的集合为

$$D_k(S_k) = \{d_k | P_{k\min} \leq d_k \leq P_{k\max}, d_k \leq S_k\}$$

指标函数为

$$V_{k*} = \sum_{i=k}^N q_i(d_i, H)$$

最优指标函数为

$$f_k(S_k) = \min \sum_{i=k}^N q_i(d_i, H)$$

由此得厂内经济运行的动态规划基本方程式为

$$\begin{aligned} f_k(S_k) &= \min [q_k(d_k, H) + f_{k+1}(S_k - d_k)] \\ d_k &\in D_k(S_k) \end{aligned}$$

式中 S_k 为状态变量,下标 k 为第 k 阶段; d_k 为决策变量,下标含意同上; P 为电站总出力, MW; P_k 为第 k 台机组功率, MW; $P_{k\min}$ 为该机组功率下限, MW; $P_{k\max}$ 为该机组功率上限, MW; H 为水头, m; $q_i(d_i, H)$ 为在 d_i 与 H 条件下对应的耗水流量, m^3/s 。其最后状态 $S_N = 0$ 。中国富春江水电站于 1980 年在厂内经济运行中建立了这样的数学模型,用查表法加速机组优化组合过程,用疏密法提高计算速度,步距为 1 MW。用 INTEL86/310 微机进行在线处理,在 10 s 内完成一次计算。实践结果,比采用等功率法分配,可以节约总耗水量 0.57%。

发展过程 水电站厂内经济运行的发展与水电站综合自动化水平密切相关,20 世纪 50 年代水电站从机组自动化向全厂自动化发展,按全厂经济运行的要求,采用等功率分配法进行机组间负荷分配,采用运行特性图解法进行机组组合,用于负荷变化频繁的大型调频水电站。美国、日本称为自动发电控制 (AGC) (见水电站自动发电控制),苏联称为自动操作器和频率与有功功率成组调整。中国 60 年代曾在丰满、新丰江、新安江大型调频水电站实现机组之间负荷经济分配,丰满水电站、新丰江水电站采用等功率法,新安江水电站采用导水叶开度相等准则分配负荷。等微增率法虽作过研究但未用于水电站。80 年代微型计算机实时监控系統在水电站应用,使厂内经济运行有了良好



的基础。具有多种机组特性的富春江水电站在厂内经济运行中首先采用动态规划法。
(屠明德 黄益芬)

shuidianzhan chuli

水电站出力 (output of hydropower station)

水电站单位时间的能量输出。水电站的出力以下式表示

$$P = 9.81\eta_t\eta_gQH \tag{1}$$

式中 P 为水电站出力, kW; η_t 为水轮机效率, 一般为 0.85~0.95; η_g 为发电机效率, 一般为 0.96~0.98; Q 为发电流量, m³/s; H 为工作水头, m。

上式也可改写为

$$P = KQH \tag{1'}$$

式中 K 为出力系数=9.81 $\eta_t\eta_g$, 一般在 0.78~0.85 之间。

发电流量决定于入库流量、水库调节性能、水库运行方式和水轮机过水能力。水头决定于水库水位和尾水位以及水头损失。水库水位在水库运行过程中随时间而变化。尾水位是发电流量和弃水流量的函数。为了使水电站的出力在一年中各月的平均值保持稳定且达到可能最大值, 必须根据径流和水库特性, 研究水库合理的消落水位和运行方式。

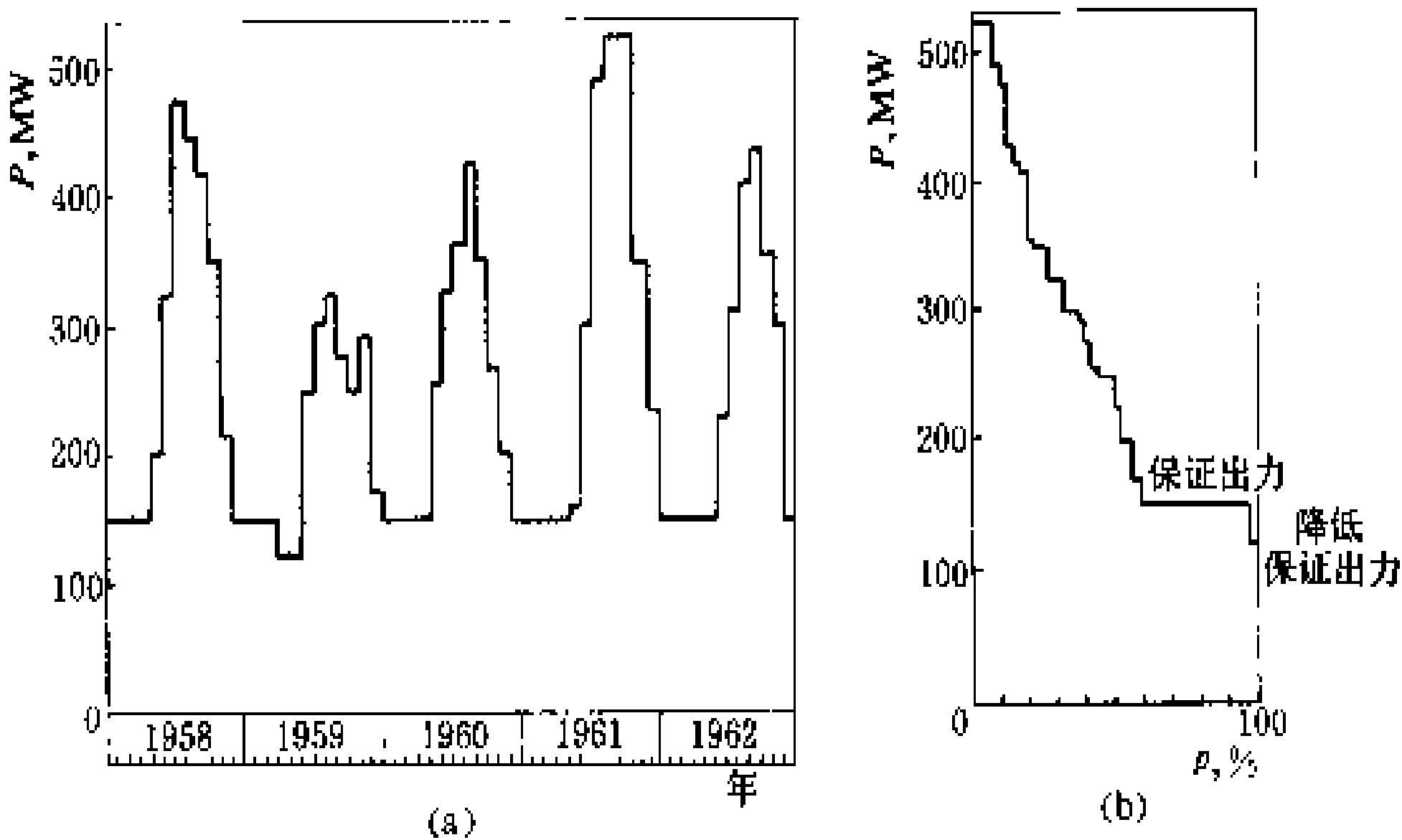


图1 季调节中高水头水电站出力过程及出力保证率曲线
(a) 出力过程; (b) 出力保证率曲线

水电站的年平均和月平均出力的分布, 在不同的电站有很大的差异。季(年)调节的中高水头水电站, 丰水年出力大, 枯水年出力小; 枯水期一般按保证出力发电; 汛期按加大出力发电; 特枯年枯水期的某些月份, 按降低保证出力发电, 正常运行遭到破坏。水电站出力过程及出力保证率曲线见图1。年调节水电站, 在全年各月的出力则较均匀。多年调节水电站, 其各年的出力及年内各月的出力均较均匀。担负梯级或跨流域补偿调节的水电站, 其出力往往枯水期大汛期小, 甚至

枯水年大丰水年小。图1是季调节中高水头水电站出力过程及出力保证率曲线的特征, 每年的枯水期发保证出力, 汛期随径流的大小而变化, 特枯年的枯水期发降低保证出力, 其保证率曲线有一个不大的保证出力“平台”。

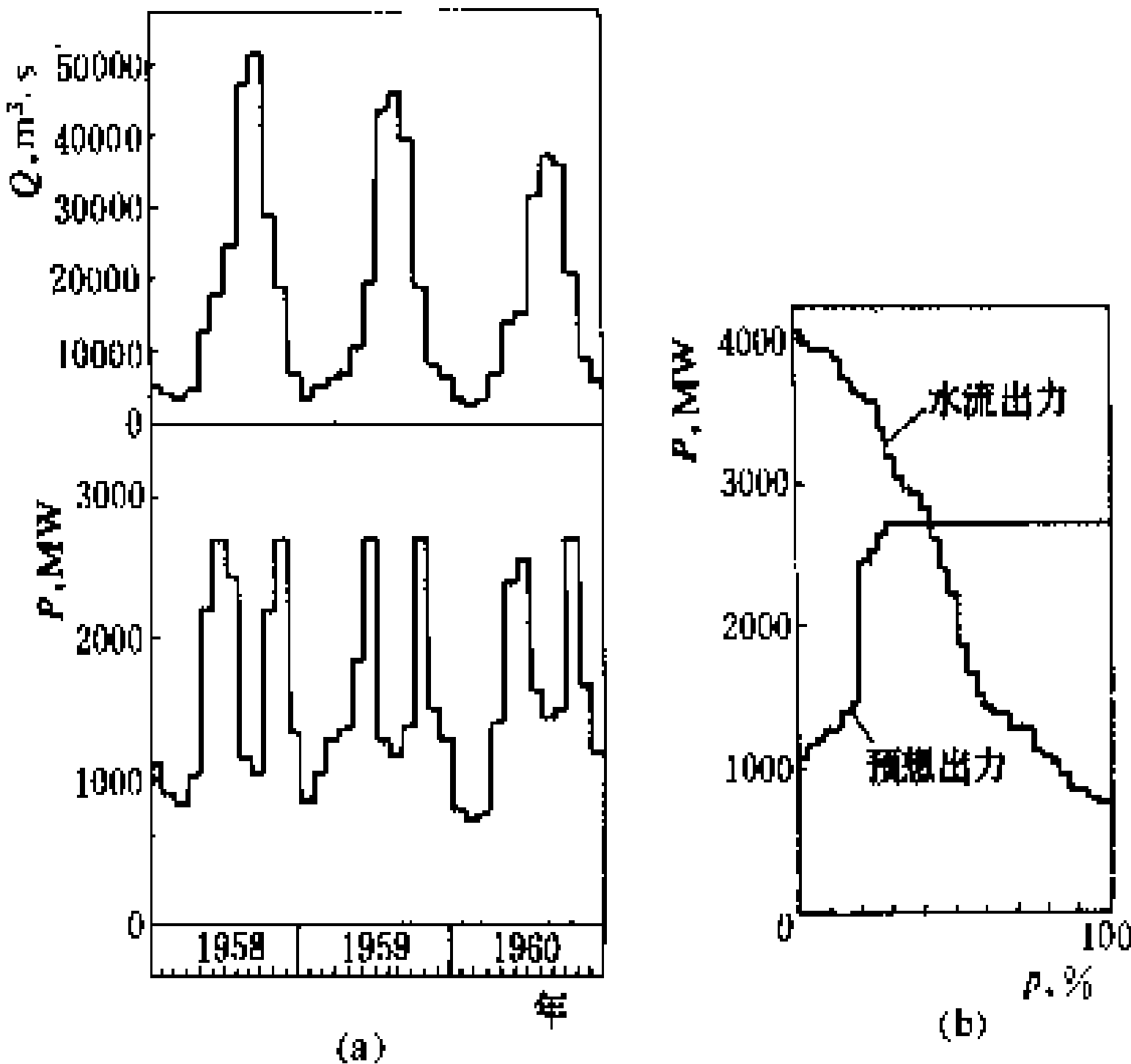


图2 径流式低水头水电站流量、出力过程及出力保证率曲线
(a) 流量, 出力过程; (b) 出力保证率曲线

调节性能差的低水头水电站, 不但枯水期出力较小, 汛期由于大泄流量引起下游水位增高而减小了水头, 也导致出力的减小, 其流量、出力过程及出力保证率曲线见图2。从图2电站的流量过程与出力过程对照可以看出, 在一年汛期的某些月份, 流量很大, 但出力反而减小, 枯水期出力也较小。在出力保证率曲线上也可以看出, 水流出力大时, 其预想出力反而小了。而且水流出力保证率曲线, 没有一个明显的“平台”。

水电站的规划设计中, 保证出力和预想出力(见水电站设计水头)是重要的指标。前者是水电站能量效益的基础, 后者是发挥水电站容量效益的基础。

(伍宏中)

shuidianzhan fanghuo

水电站防火 (fire protection in hydropower station)

为防止火灾发生, 阻止火灾蔓延和及时扑灭火灾, 对水电站各类建筑物、构筑物 and 主要机电设备采取的消防措施。这些措施主要包括: 对建筑物按火灾危险性分类并确定其耐火等级; 确定变压器和储油罐等具有大量绝缘油、透平油的设备和设施与各类建筑物和设施的防火间距; 对厂区配置消防设施; 对主

要机电设备和设施设置相应的灭火设备；对有值班人员、巡视人员或检修人员进入的建筑物设置安全出口；设置火灾时阻断空气、火灾后排烟消烟的设施等。

水电站的设备中，有绝缘油和透平油的储藏设施、充油电气设备、高压或超高压电力电缆和集中敷设的动力电缆和控制电缆。这些设备和设施，一旦因设备事故或人为过失，引起火灾，即有可能蔓延扩散，造成大面积建筑物和设备毁坏，甚至人身伤亡。由于火灾造成水电站长时间部分停止发电或全厂停止发电的严重情况，不乏先例。

关于防火，世界各国都有各自的规定。涉及水电站防火的中国现行规范有 GBJ16-87《建筑设计防火规范》和 SDJ278-90《水利水电工程设计防火规范》。后者为行业标准，在遵循前者各项原则规定的前提下，按水电站的生产特点和实际情况，作具体规定。

建筑物火灾危险性分类及耐火等级 工业建筑物火灾危险类别的划分，主要依据的条件是：①生产中的原料、半成品和成品的易燃易爆程度及其数量。②生产过程中的温度、压力等工艺条件。③其他能导致火灾和爆炸的条件等。中国《建筑设计防火规范》把工业建筑物的火灾危险性分为甲、乙、丙、丁、戊五类：①甲类为使用或产生极易燃烧或爆炸物质的生产，这些物质如闪点 $<28^{\circ}\text{C}$ 的液体、爆炸下限 $<10\%$ 的气体、常温下能迅速自燃或爆炸的物质等。②乙类为使用或产生易燃燃烧或爆炸物质的生产，这些物质如闪点 $\geq 28^{\circ}\text{C}$ 至 $<60^{\circ}\text{C}$ 的液体、闪点 $\geq 60^{\circ}\text{C}$ 的液体雾滴、爆炸下限 $>10\%$ 的气体、能与空气形成爆炸性混合物的粉尘、纤维等。③丙类为使用或产生可燃物质的生产，这些物质如闪点 $\geq 60^{\circ}\text{C}$ 的液体、可燃固体等。④丁类为火灾危险性较小的生产，如：对非燃烧物质加工并经常产生强辐射热、火花或火焰的生产；常温下使用或加工难燃烧物质的生产；生产中需燃烧气体、液体或固体进行加热，或做其他用途的生产等。⑤戊类为常温下使用或加工非燃烧物质的生产。

水电站所使用的透平油的闪点在 135°C 左右，所使用的绝缘油的闪点为 $180\sim 195^{\circ}\text{C}$ ，此外，无其他易燃、易爆物质参与生产过程，因而水电站没有甲、乙类火灾危险的建筑物。前述《水利水电工程设计防火规范》规定水电站属于丙类火灾危险的建筑物有：油浸式变压器（电抗器，消弧线圈）室；单台设备充油量 $\geq 100\text{ kg}$ 的配电装置室；屋外主变压器场；电缆室、电缆隧道和竖井；防酸隔爆型铅酸蓄电池室及其附属房间；柴油发电机室及其检修间；绝缘油、透平油的油处理室、再生室、储油罐室以及独立变压器检修间等。其他建筑物为丁类或戊类。

中国《建筑设计防火规范》把建筑物耐火等级分为

四级。建筑物的耐火等级是由建筑物构件的燃烧性能和最低耐火极限决定的。在同一等级建筑物中，由于建筑物构件在建筑物遭受火灾时造成危害的程度及其在建筑结构中的地位不同，对其燃烧性能及其耐火性能的要求也不同，例如对承重墙的要求比柱高，对柱的要求比梁高，对梁的要求比楼板高，对楼板的要求比房间间隔高等。一般说来，一级耐火等级建筑是钢筋混凝土结构或砖墙和钢筋混凝土组成的混合结构；二级耐火等级建筑是钢结构屋架、钢筋混凝土柱或砖墙组成的混合结构；三级耐火等级建筑是木屋顶和砖墙组成的砖木结构；四级耐火等级建筑是木屋顶难燃烧墙壁组成的可燃结构。

工业建筑物的耐火等级是根据建筑物火灾危险类别并考虑建筑物的重要性程度决定的。一般，甲、乙类火灾危险建筑物的耐火等级不低于二级，丙类不低于三级，丁、戊类允许四级。《水利水电工程设计防火规范》规定的水电站丙类火灾危险建筑物的耐火等级为一级和二级，丁类和戊类火灾危险建筑物的耐火等级为二级和三级，没有四级。

防火间距 为减轻或阻止火灾蔓延，各建筑物间要隔开一定距离，称为防火间距。防火间距与建筑物的火灾危险类别及其建筑物耐火等级有关。水电站主要规划好主变压器、储油罐等生产火灾危险性较大的设备和其他建筑物、构筑物间的防火间距。防火间距的数值在《水利水电工程设计防火规范》中有明确规定。其中主变压器和储油罐相互间以及与其他建筑物间的防火间距，为 $10\sim 50\text{ m}$ 不等。油量大的比油量小的间距大，至非生产建筑物比至生产建筑物的间距大，至耐火等级低的建筑物比至耐火等级高的间距大。

为避免或减少因环境原因导致火灾，绝缘油和透平油露天油罐与架空线的边相、厂区铁路装卸线中心线和厂区主要道路边线，要有一定距离。《水利水电工程设计防火规范》分别规定其最小距离为1.2倍电杆高度， 10 m 和 5 m 。

主要机电设备的防火 除对水电站全厂配置消防车、消防车道、消火栓、消防供水系统、手提式灭火器、沙箱、排烟消烟系统等消防设备和设施外，还须对主要机电设备和设施配置固定式专用消防设备，一方面，是为保护这些设备和设施免遭严重损坏，另一方面，也是为了防止火灾产生和扩大。

(1)水轮发电机防火。水轮发电机定子绝缘事故可能引起火灾，造成发电机损毁。目前，用于水轮发电机灭火的装置有喷水灭火和二氧化碳灭火两种。中国主要采用喷水灭火方式。发电机定子如采用有阻燃特性的绝缘，原则上无须再设灭火装置，但实践中也有设置的。

(2) 电力变压器防火。现代大容量电力变压器均为油浸式变压器。变压器内装有大量绝缘油。当变压器绕组发生短路故障,在电弧和高温作用下,绝缘油不断分解,产生大量可燃气体,变压器油箱内压力急剧升高,使油箱破裂,高温油、气喷出燃烧,极易扩大火灾范围。按继电保护有关规程装设继电保护装置,是防止变压器内部故障发展成火灾事故的重要措施,特别是瓦斯保护,对防止火灾的发生颇为有效。在变压器下面设排油坑,并设卵石层灭火,屋内变压器室还要设门坎挡油等,是火灾发生后避免火灾扩大的有效措施。设置专用灭火装置是扑灭火灾的措施。当前,变压器灭火有水喷雾灭火,充氮搅拌灭火和卤代烷灭火三种。在中国,大多使用水喷雾灭火。

(3) 电缆防火。充油电缆易于着火。聚氯乙烯和聚乙烯电缆多层重叠密集敷设或成捆敷设时也易于着火。在电缆室、电缆隧道及电缆集中架空敷设的廊道的出、入口设置沙箱和手提式灭火器材。对大型电缆室、电缆隧(廊)道和电缆竖井最好设置水喷雾等固定式灭火系统。35 kV 及以下电压的动力电缆与控制电缆一同敷设时,应分层排列,动力电缆上下层间,均应装设耐火隔板。110 kV 及以上高压单芯充油电力电缆一般用难燃电缆槽盒、埋沙沟槽或耐火隔板分相敷设。当三相电缆明敷时,则设固定式灭火系统。近年来,已出现不燃电缆,这将使电缆防火趋于简便。

(4) 充油配电装置防火。少油断路器、电压互感器、电流互感器附近设手提式灭火器。气体绝缘金属封闭电器室配置手提式卤代烷灭火器。110 kV 及以上屋内开敞式开关站设置固定式灭火系统和排烟或消烟设施。

(5) 中央控制室防火。中央控制室为全厂控制中枢,设有全厂的控制设备,一般设小型固定卤代烷灭火装置。继电保护室、电子计算机房、自动和运动装置室、通信室等的防火措施与中央控制室相同。

(6) 油存储系统防火。厂房内的油罐室油罐总容积不大于 200 m³,并用防火墙与厂房其他部分隔开。厂内、外油罐室和露天油罐设泡沫灭火设备或固定式灭火系统。油罐室设事故排油、储油设施,露天油罐设防雷和防止油流散设施。

(黄贤鉴)

shuidianzhan gongcheng guihua

水电站工程规划 (hydropower project planning)

选择经济合理的水电站规模和运行方式的研究工作,是水电站设计的重要内容之一。一般是通过多方案比较,以方案间的产出增量大于投入增量为原则选择较大规模的方案,或以等量效益为前提选

择费用最小的方案。因为很难用货币量确切计算水电站对社会、环境的影响,所以有时不完全根据经济比较选择方案,而要从经济、社会、环境等方面综合比较选择。对以发电为主的水电站一般以满足确定的防洪等要求为前提,只分析电力电量效益和费用的差别选择方案。对综合利用任务较重的水电站,有时把综合利用各部门作为一个整体选择最优的规模和运行方式;有时根据防洪、灌溉、航运等要求选择水库规模和运行方式,据此相应选择水电站的装机规模和引水系统规模。

水电站规模包括装机规模、库容规模和引水系统规模。直接影响水电站电力、电量效益大小的是装机规模。装机规模较大可以允许较多水量通过机组发电,为获得较大效益提供条件。但水电站效益大小主要决定于电站所在河段的水能资源量及其可开发利用的程度。而利用程度往往决定于水电站的库容规模。所以库容规模选择常是其他规模选择的基础。引水规模一般据装机规模相应配置,但对引水式水电站因引水系统需较多投资,对装机规模选择会产生较大影响,则装机规模和引水系统规模宜结合在一起选择。

装机规模选择 装机容量直接反映水电站的装机规模,但装机容量是由若干台机组组成的,所以在选装机容量时要结合其他一些特征值,如水轮机的型式、台数和直径,同时比选,只是装机容量选择常居其他特征值选择的主导地位。一般是先拟定若干适用于本水电站水头条件下的水轮机机型,对每种机型再拟定若干个机组台数方案,相应配以各种水轮机直径,据此可以组成多种装机容量方案。经过电力系统电力电量平衡分析,不同的装机容量方案可以获得不同的电力、电量效益。装机容量愈大,效益愈大。但增大装机容量相对要增加投资,只是不同的机型或不同的台数方案使投资增加的趋势不尽相同。经过投入和产出的经济比较后选择出经济合理的装机规模。对不同水电站增加装机容量的目的常不相同。一般情况下对调节能力较好的水电站,增加装机容量的目的主要在于增大电力,附带增加电量。对调节能力差的水电站,增加装机到一定程度后,再增加规模主要为多获电量,附带增加电力。

在机型方面一般采用效率高或过水能力大的水轮机机型。对以电量效益为主的水电站常采用效率高的机型,在相同水量条件下可获得较多电量。对以电力效益为主的水电站常采用过水能力大的机型,在相同水轮机直径条件下可提供较大电力。

在机组台数方面,据电力系统情况选择。一般少台数方案配以单机容量较大的机组,所需投资较少,但运行灵活性和运行效率降低,可能要求电力系统增加事故备用容量。当本水电站装机容量占系统比重较大时

常采用台数较多的方案,而比重较小时采用少台数方案。

库容规模选择 库容分调节库容、调洪库容和死库容(见水库)。所以库容规模选择包括选择正常蓄水位、汛期限制水位、死水位、防洪高水位、设计洪水位和校核洪水位。

以发电为主的水电站一般以正常蓄水位选择居于主导地位,配合选择其他库水位特征值。选用较高的正常蓄水位可取得较高水头和较大调节库容,可较充分地调节径流以提高电力、电量效益,也有利于协调水资源利用各部门之间的矛盾(见水资源综合利用)或提高梯级水电站的效益;但将增加水库淹没损失和工程量,从而增加投资。正常蓄水位有时根据经济比较选定,有时据水库淹没损失限制或上级水电站尾水位高程确定(见正常蓄水位)。

死水位选择常配合正常蓄水位方案进行,当正常蓄水位一定,较高的死水位可增加水电站的利用水头但减少水库的调节库容,增加水头可增加电力、电量效益,减少调节库容则减少电力、电量效益,一般以取得最大电力、电量效益为准则选择死水位。调节径流任务重的水电站常选相对低的死水位。但有时据航运要求(为保持库区必要的航运水深)或泥沙淤积条件(为淤积多留库容)选定死水位。

选择汛期限制水位在于经济合理地重复利用位于正常蓄水位以下的调节库容,使其中部分库容在非汛期用于兴利调节,在汛期用于防洪。但过低的汛期限制水位会影响水头利用,有时会减少枯水期电量,一般据经济比较选择。有时也有为了减少水库淹没损失或为减少库内泥沙淤积量而降低汛期限制水位的。

防洪高水位选择 一般根据防洪要求的防洪库容确定,有时与防洪标准一并选择,据防洪效益大于为此而增加的工程投资和淹没损失为条件选定。

设计洪水位和校核洪水位选择 一般按坝和泄水建筑物合计的投资最少选择,因较高的设计洪水位和校核洪水位要增加坝的工程量却可减少池水建筑物的工程量。

引水系统规模选择 主要包括输水道的型式、路径和其断面尺寸的选择。型式有无压和有压两种。无压输水道一般为明渠,个别地段为隧洞。有压输水道一般为隧洞,有时为管道。无压输水道的优点是沿线可同时施工,其地质条件容易查明,缺点是不能大幅度及时改变流量,所以一般只在径流式水电站或中小型日调节水电站采用。多数水电站采用有压输水道。无压输水道路径一般随地形等高线布置,必要时用渡槽跨越深沟或用无压隧洞穿越高山。有压输水道的路径一般是从进水口到出水口成直线布置,有时为了增多施工工作

面或为了避开不利的地质条件才改直线为折线。输水道的条数和断面尺寸一般由经济比较选择,选择时考虑的因素一般有:投资、施工条件、地质条件、工期、水头损失及因此引起的电力电量损失和对发电设备投资的影响等。

调度方式选择 分兴利调度和调洪调度。当库水位在汛期限制水位或正常蓄水位以下时进行兴利调度,在汛期限制水位以上进行调洪调度(见水库)。兴利调度方式根据水库所承担的调节任务选择。发电要求根据用电需要分配水量,年内各月均匀分配;日内负荷高峰时多给水,负荷低谷时少给水甚至不给水。因此水库在汛期蓄水,枯水期补水;负荷低谷时蓄水或少补水,负荷高峰时补水。灌溉要求在灌溉期多供水(在中国一般是4~10月),且日内均匀,非灌溉期不供水。航运一般希望年内各月、各小时都均匀供水。在寒冷地区冬季因冰冻而不通航,如中国边界的黑龙江的通航期为5~10月,则不要求枯水期给水。调洪调度也有两类。若水库下游不要求水库调节洪水,当库水位已蓄到汛期限制水位,而来水还在增长时,水库将尽可能泄水出库不蓄水,除非受泄水建筑物泄水能力限制才蓄水,当来水洪峰过后仍继续尽能力泄水直到库水位降到汛期限制水位时为止。若水库下游为减免洪灾损失而要求水库削减洪峰流量到某一安全泄量时,水库按另一种调洪调度方式运行,即限制出库流量使之不大于安全泄量(见洪水调节)。后一种调度方式仅限于当库水位不高于防洪高水位时运用,当高出时仍按前一种调度方式运行。

对单纯发电的水电站,水库的兴利调度方式的选择在于选出各月的某一水位边际值。当库水位齐平或低于该边际水位时,水库按保证出力要求供水发电;高出时适当多供水发电(见水库调度图)。选择所遵循的准则是水电站要获得最大的电力、电量效益。

若水电站水库承担有其他供水任务(如灌溉、城乡工业生活用水、航运等)时,兴利调度方式的选择在于确定供水的主次关系和对次要任务供水量的满足程度。当水库的主要任务是发电时,确定调度方式的指导思想是:遇设计枯水年时首先满足发电用水,减少向其他部门供水,如减少到正常供水量的50%~80%;若来水较丰(保证率较低)则满足各部门用水要求。具体方法也是选出各月水位边际值。当库水位低于该边际值时,水库按水电站的保证出力及其他部门用水的50%~80%供水;当高于边际值时满足各方要求。若发电是次要任务则先满足主要任务用水,后满足发电用水。发电的出库流量在日内很不均匀而影响下游其他用水要求时,一种解决方式是发电日运行方式不变,在其下游建反调节水库协调矛盾(见水资源综合利用);



另一种解决方式是改变水电站运行方式,在负荷低谷时保持一定流量发电以满足其他用水要求。

调度方式选择涉及各部门或各地区的效益分配,一般通过部门或地区间的协商解决,也可根据国民经济整体效益最大原则选定。

规划方法 水电站工程规模选择是一项涉及众多特征值选择且各特征值之间又互有联系、互有影响的整体规划工作。规划方法有两类。一类方法是把各特征值都作为变量,用系统规划方法统一选出各特征值,形成各特征值的最优组合,使整体最优(见水能利用)。这类方法的计算工作量很大,分析计算所需的基础资料很多,只能随着设计阶段的进展逐步深入和补充,所以规模选择常采用另一类方法:迭代选择。如先暂定正常蓄水位与其他特征值的相对关系,从若干正常蓄水位方案中选出正常蓄水位。据选出的正常蓄水位选择死水位和汛期限制水位等。接着再选择装机容量等。若选出的死水位、装机容量与暂给定的相对关系不一致,则重新调整相对关系再选择正常蓄水位和其他特征值,逐步逼近最优组合。中国的水电站设计规范要求:在可行性研究报告阶段要选定或基本选定正常蓄水位、汛期限制水位和装机容量,对引水式水电站还要选定输水道型式、基本选定路径和断面尺寸;在初步设计阶段才选定所有特征值。

(欧阳华)

shuidianzhan gongyong shebei zidong kongzhi

水电站公用设备自动控制 (automatic control for auxillaries of hydropower station)

为辅助全电站主设备运行的技术供水、排水、压缩空气和压力油等系统的自动控制技术。实现自动控制的基本要求为:①各部分自成独立系统,除自动控制外在现地还能手动控制,具有必要的事故和异常运行工况信号。②一般都有主用设备和备用设备,主用设备不能满足工作要求时,备用设备自动投入,设备处于主用或备用状态,可由人工选择。③被控对象一般为交流电动机,为了维持被控对象的控制系统的独立性,对于380/220 V交流电动机,其控制电源一般与电动机取自同一电源,当主用和备用电动机而不同厂用电回路供电时,其公用控制回路要考虑电源自动切换。

技术供水系统自动控制 技术供水系统为水轮发电机组冷却、轴承润滑、大轴密封和变压器冷却以及水内冷设备二次冷却水等提供水源。自动控制的任务是维持供水系统的水压和水量。其方式有:①当采用水泵供水时,水泵的起、停是由机组等主设备投、切而连动,水泵运行台数由主设备总耗水量决定,水泵将随机组等主设备运行而连续工作。当供水总管的水压或流量

不足时,自动投入备用泵。②当采用水池供水时,靠水泵维持水位,当水位下降到下限值时,主用泵起动,水位若继续下降到过低值时,备用泵起动,水位恢复正常,水泵停止。③当采用水库或压力钢管等自流供水方式时,无需装设维持水压或流量的自动控制设备。(见水电站供水系统)

排水系统自动控制 厂内水工建筑物、水力系统的渗漏水一般都经排水管或排水沟集中到集水井内,利用排水泵自动将其排出厂外,其控制程序:当井内水位上升到上限值时,主用排水泵起动,若水位继续上升到过高值时,自动投入备用排水泵,待水位恢复正常,排水泵停止。由于防潮的要求,自动控制接线可采用主用泵和备用泵自动轮流倒换的方式。(见水电站排水系统)

压缩空气系统自动控制 压缩空气系统分低压和高压两种系统,自动控制的任务是维持储气罐的气压和保证设备的安全。(见水电站压缩空气系统)

(1)低压压缩空气系统自动控制。低压压缩空气压力一般为0.7~0.8 MPa,主要用于机组停机的机械制动、机组调相压水、水轮机大轴密封围带和进水阀密封围带充气等。其控制系统要满足:①储气罐压力低于下限值时,主用空压机起动,当气压继续下降达过低值时,自动投入备用空压机,气压恢复正常时,停空压机。②当装有空载起动电磁阀时,空压机刚起动时,该阀应打开,空压机起动后,该阀关闭。③空压机出气管温度过高时,自动停机。④对于水冷式空压机,运行时应投冷却水,冷却水中断时,发信号并延时停机。⑤当设有油润滑系统时,油温过高要发信号并延时停机。

(2)高压压缩空气系统自动控制。高压压缩空气压力一般为2~4 MPa和2.5~6.4 MPa,主要用于油压装置补气及高压配电装置的空气断路器和气动操动机构。其控制系统要满足:①气压降低至下限值时,起动主用空压机,气压降至过低值时,起动备用空压机,气压恢复正常时,停空压机。②一般设有排污阀,兼作空载起动用,空压机刚起动时,该阀应打开,起动后该阀关闭。③监视润滑油油温,油温过低时,起动加热器,并发信号;当油温过高及油压过高或过低,均作用于停机,并发信号。④各级气缸气压过高,发信号并停机。⑤监视压缩空气的干燥器的温度,温度过高时发信号。

压力油系统自动控制 压力油系统为水轮机、进水阀和快速闸门等液压操作系统提供压力油源(见水电站油系统)。控制系统的任务是维持压油罐的压力及罐内的压缩空气量。为了维持压油罐的油压,压油泵运行方式有连续式和断续式两种:①连续工作方式。主用油泵连续运行,油泵向压油罐供油是由卸载阀控制,当压油罐压力降至工作下限时,油泵向压油罐供油,若油

压继续下降至过低值时,起动备用泵,加强向罐内供油,当油压回升至接近上限值时,停备用泵,油压升至上限值时,主用泵的卸载阀动作,油泵输出的压力油被卸载阀短路而排回回油箱。②断续工作方式。压油罐油压降至下限值时起动主用泵;若油压继续下降达过低值时起动备用泵;油压回升至上限值时停油泵。这种方式有节省电能、降低油泵磨损等优点,但起动接触器动作频繁而易损坏。近年已有用交流无触点开关代替接触器的。

压油罐内需要补充压缩空气,其控制方式一般采用:当压油罐油位上升到上限值且油压低于额定值时,打开补气阀补气,当油位低于下限或油压高于额定值,关补气阀,停止补气。

(梁见诚)

shuidianzhan gongshui xitong

水电站供水系统 (water supply system of hydropower station) 为满足水电站机电设备

运行中所需各类用水,由取水、扬水、滤水设备、管件和阀门等组成的供水管网。包括技术供水(冷却、润滑)、消防和生活供水等。

供水对象及水质要求 各种供水对象对水质有不同要求。

(1)冷却供水对象主要有:①发电机空气冷却器;②机组的各轴承油冷却器;③调速器油压装置的回油箱;④变压器油冷却器;⑤水内冷发电机的二次水冷却器;⑥水冷式空气压缩机;⑦空调喷水装置等。水压一般为 0.2~0.5MPa,水温低于 28℃的河水均可。

(2)润滑用水主要有水轮机橡胶轴承的润滑水,要求水中含泥沙量在 50 mg/L 以下,泥沙粒径在 0.025 mm 以下。

(3)消防用水对象主要有:①发电机;②变压器;③电器电缆设备;④油库油处理室;⑤主副厂房建筑物等的消防。要求有专门水池贮水且水压不低于 0.2~0.4 MPa。

(4)生活及清洁用水,应满足卫生要求。

供水方式 包括自流供水、水泵供水、混合供水和顶盖取水等。

(1)自流供水。直接从水库、压力钢管或厂外其他水源取水供给,广泛适用于 15~80 m 水头的电站,水

头大于 80 m 时也常用装设减压设备的自流供水,自流供水简单、运行可靠、维护方便。

(2)水泵供水。利用离心水泵或射流泵自蜗壳、尾水或地下取水供给,适用于水头大于 100 m 或小于 15 m 的电站。

(3)混合供水。兼有自流和水泵供水两套设备的供水方式,适用于水头变幅很大的水电站。

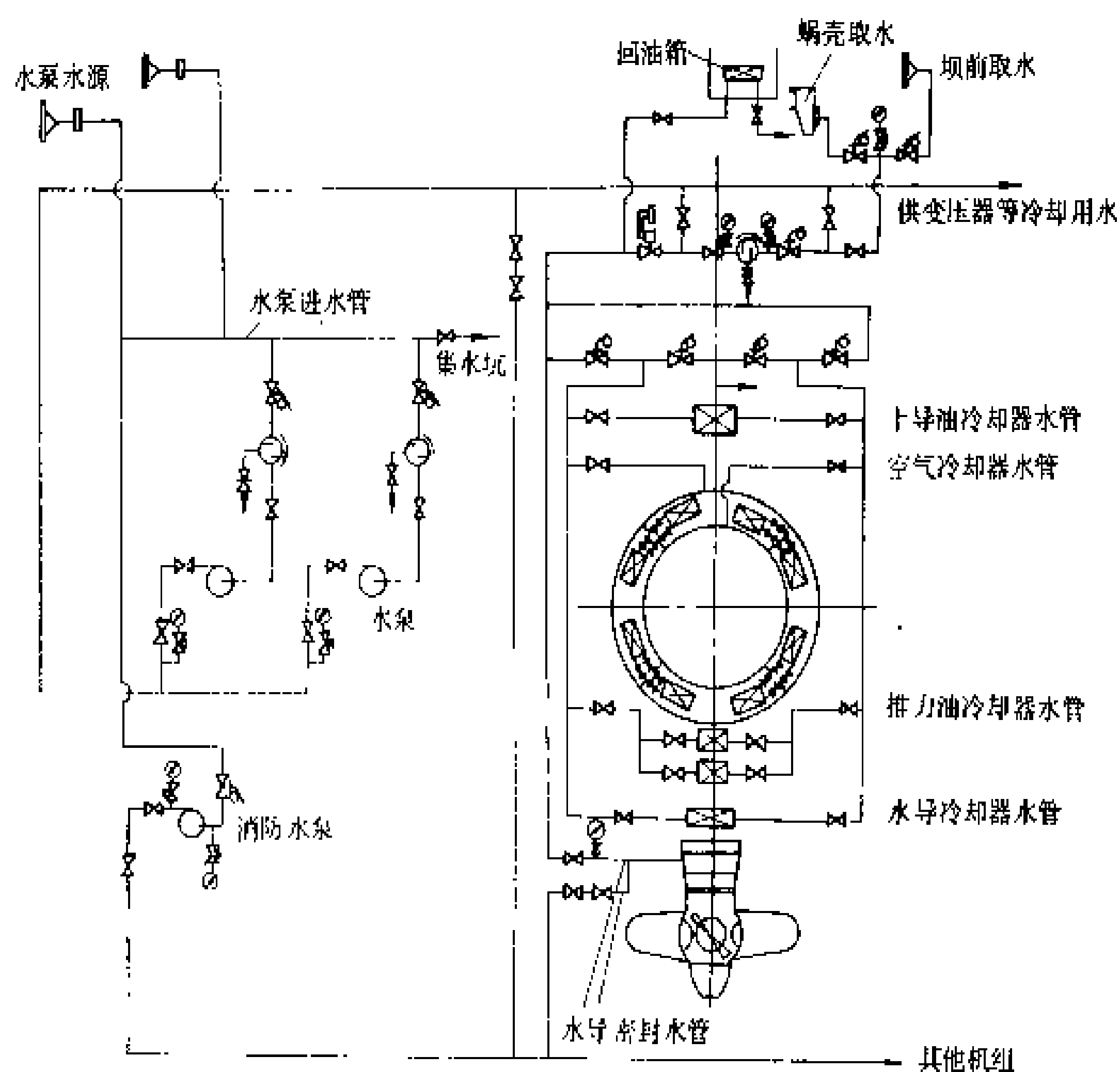
(4)顶盖取水。自混流式水轮机顶盖上引取转轮上迷宫环泄漏的具有一定余压的水供给,仅适用于 100 m 以上水头的混流式水轮机的水电站上。

供水系统 它包括单元供水和集中供水系统。

(1)单元供水。以单台机组为单元建立的供水系统,与机组同步运行或停运。

(2)集中供水系统。由全厂供水水泵或自流取水管路集中组成,随运行机组的台数分别投入相应的水泵或管路。

包含自坝前和蜗壳取水,水泵供水的混合供水系统示意图见图。



自流和水泵混合供水系统示意图

(青长庚)

shuidianzhan guodianya baohu

水电站过电压保护 (overvoltage protection for hydropower station) 防护和限制水电站

电气设备上的雷电过电压和内部过电压,以保护设备绝缘免遭损害的技术。雷电过电压,也称大气过电压,是因雷电直击设备、雷电感应或雷电波侵入产生的电

压升高。因而,雷电过电压保护分为直击雷保护、感应雷保护和雷电侵入波保护三类。内部过电压是在电力系统操作或故障时产生的电压升高。内部过电压保护分为操作过电压保护和暂时过电压保护。

直击雷保护 用避雷针或避雷线防止雷电直接击中设备的保护措施。避雷针由接闪器、接地引下线和接地体等三部分组成,是一个引导雷电流入地的良好通道。雷云对地放电先导头部,向前发展到离地面一定高度时,避雷针在畸变电场中,引导雷击自身,从而保护设备免遭雷击。避雷线的防雷原理与避雷针完全一样,但结构有所不同。它的接闪部分不是针状导体,而是一条水平长导线,叫架空地线。处于避雷针(线)保护范围内的设备可以受到保护,然而也有受到直接雷击的可能性。受直接雷击的概率称为绕击率。避雷针(线)保护范围是避雷针(线)的高度和绕击率的函数。图1所示的单支(根)避雷针(线)的保护范围是根据实验和运行统计资料确定的。实验中,绕击率取为0.1%。多支(根)避雷针(线)联合可以保护更大的范围。

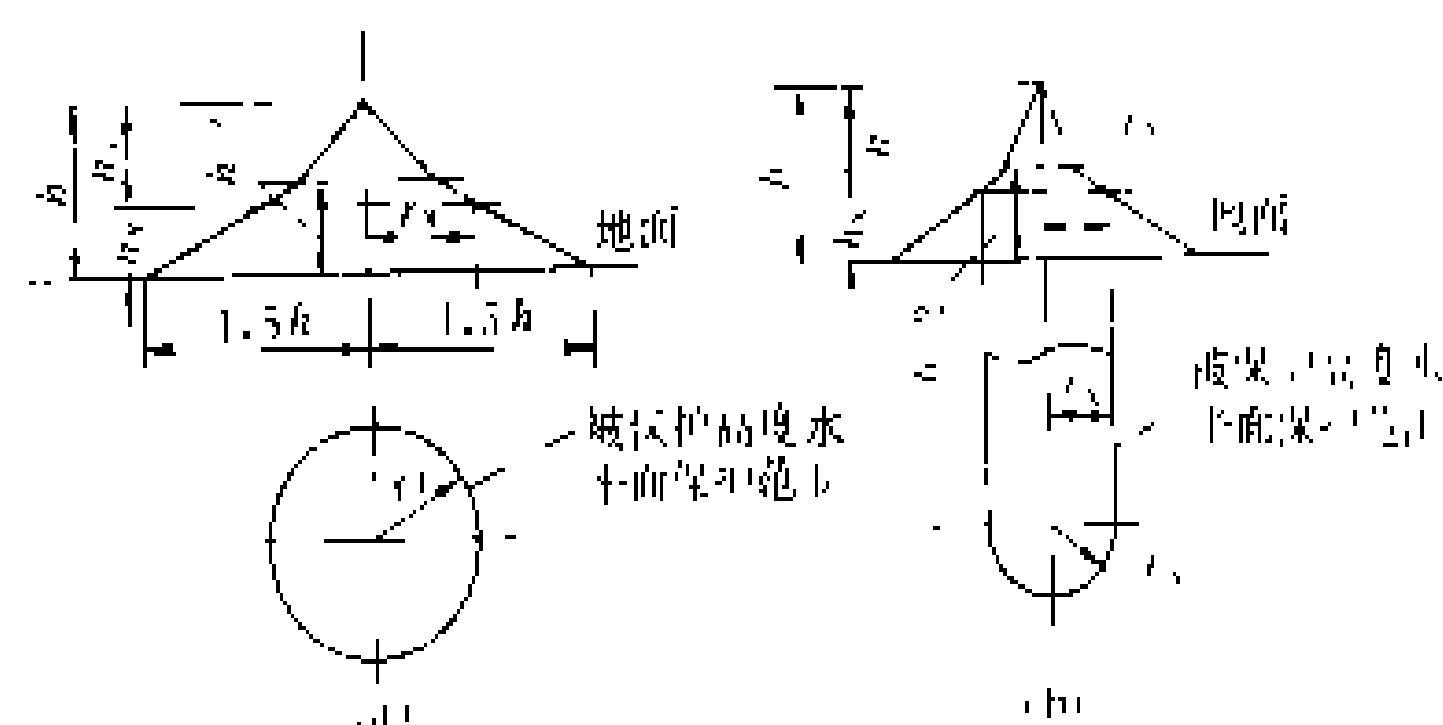


图1 单支(根)避雷针(线)保护范围
(a) 单支避雷针保护范围; (b) 单根避雷线保护范围

(1) 单支避雷针的保护范围按下式计算

$$\left. \begin{aligned} h_x \geq h/2 \text{ 时, } r_x &= (h - h_x)p = h_x p \\ h_x < h/2 \text{ 时, } r_x &= (1.5h - 2h_x)p \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 r_x 为避雷针在 h_x 高度水平面上的保护半径, m; h 为避雷针高度, m; h_x 为被保护物的高度, m; h_x 为避雷针有效高度, m; p 为高度影响系数, 当 $h \leq 30$ m 时, $p = 1$; 当 $120 \text{ m} \geq h > 30 \text{ m}$ 时, $p = 5.5/\sqrt{h}$ 。

(2) 单根避雷线的保护范围按下式计算

$$\left. \begin{aligned} h_x \geq h'/2 \text{ 时, } r'_x &= 0.47(h' - h_x)p \\ h_x < h'/2 \text{ 时, } r'_x &= (h' - 1.53h_x)p \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 r'_x 为避雷线在 h_x 高度水平面上保护范围每侧的宽度, m; h' 为避雷线悬挂高度, m; h_x 为被保护物的高度, m; p 为高度影响系数, 当 $h \leq 30$ m 时, $p = 1$; 当 $120 \text{ m} \geq h' > 30 \text{ m}$ 时, $p = 5.5/\sqrt{h}$ 。

(3) 反击过电压。避雷针(线)遭受雷击, 雷电流流过避雷针(线), 经接地电阻入地, 产生高电位, 形成对附近设备的反击过电压, 可能损害设备的绝缘, 因

而避雷针至设备带电部分的空间距离和其接地装置间的地中距离都要校验。

水电站主厂房上、下游侧往往布置主变压器或其他电气设备, 保护这些设备的避雷针或避雷线的杆塔立在厂房顶上, 其接地引下线接到厂房接地网上。一旦雷击这些结构, 接地网上必然产生冲击高电位。凡在接地网上接地的设备, 其连接点与避雷针(线)接地连接点间电气距离近的, 如变压器, 都有可能承受较高的反击过电压, 对危及绝缘的反击过电压要采取保护措施。

感应过电压保护 电气设备附近, 雷电放电, 经空中电磁感应在设备上产生过电压, 其幅值一般较低, 只对 60 kV 及以下的母线、组合导线、引出线等有危险。这些设施要尽量远离避雷针(线)和较高的建筑物, 以降低感应过电压。

雷电侵入波过电压保护 从输电线侵入水电站开关站的雷电波, 加到开关站的高压电气设备上, 并通过主变压器传递到发电机电压电气设备和发电机上, 可能损坏电气设备的绝缘。水电站中, 保护的主要对象为主变压器、高压电气设备和发电机。

一般, 在开关站的各段母线上装设阀型避雷器或金属氧化物避雷器保护高压配电装置和主变压器。水电站的主变压器往往距离开关站较远, 侵入波虽经避雷器限制为残压值, 但经折射反射来回振荡后, 在变压器入口处将产生高幅值过电压波。经校验如超过允许值, 变压器入口处要装阀型避雷器或金属氧化物避雷器。

在电力系统中带峰荷的水电站, 机组起停频繁, 为防止发电机与主变压器断开时, 耦合过电压危及主变压器低压侧绝缘, 三绕组变压器、自耦变压器或设有发电机断路器的双绕组变压器接发电机的低压侧要装设避雷器保护。

为了限制侵入波的幅值和陡度, 在全线无架空地线的高压输电线的进线, 要设 1~2 km 的架空地线, 作为进线保护段, 以降低雷电入侵波的陡度和幅度。对木杆或木横担钢筋混凝土线路, 进线段首端装一组管型避雷器, 以限制雷电压的幅值; 在线路侧的隔离开关(或断路器)应装一组管型避雷器或间隙, 以保护断开的隔离开关(或断路器)。

由于雷电侵入波在绕组中振荡产生过电压, 对分级绝缘的变压器的中性点有危害, 该中性点要装阀型避雷器(或金属氧化物避雷器)或间隙保护。对全绝缘变压器的中性点只有三相来波才有危险。而三相来波的几率, 对 60 kV 及以下的变压器有 10%, 对 110 kV 及以上的变压器极小。因此, 对 60 kV 及以下的全绝缘变压器的中性点须保护。

内部过电压保护 内部过电压是电力系统在操

作、故障引起的过渡过程中,由于能量传递或转换所产生的电压升高。内部过电压分为操作过电压和暂时过电压两类。操作过电压的波形特点是需要考虑的波幅最大值只有一个。暂时过电压或者是持续波,或者具有多个波幅最大值,并且不衰减或衰减较慢。水电站可能出现的内部过电压有工频电压升高、切空载线路过电压、切空载变压器过电压、不接地系统弧光接地过电压、参数谐振过电压和铁磁谐振过电压等。

(1) 工频电压升高及其限制措施。产生工频过电压的原因主要是空载长线电容效应和发电机突然甩负荷。

空载长线沿线路电压升高分布情况见图 2。线路末端的电压值见式 (3)。

$$U_e = \frac{E}{\cos \lambda - \frac{x_s}{Z_1} \sin \lambda} \\ = E \cos \varphi / \cos (\lambda + \varphi) \quad (3)$$

式中 U_e 为线路末端电压, kV; E 为送端系统等值电动势, kV; λ 为弧度表示

的线路波长, rad ; $\lambda = \omega l / v$ 其中 (ω 为角频率, rad/s ; l 为线路长度, km; v 为电波速, km/s);

$\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{x_s}{Z_1}$, rad; x_s 为

送端系统等值电抗, Ω ;

Z_1 为线路波阻抗, Ω 。

由式 (3) 可见, 当线路长度很长时, $\cos (\lambda + \varphi)$ 很小, 线路末端电压会升得很高。

由于某种原因, 长线路末端断路器突然开断, 甩掉负荷, 线路末端出现式 (3) 所给出的结果。在甩负荷瞬间, 根据磁链不变原理, 发电机的暂态电动势 E_d' 不变, 式 (3) 的首端电压应为 E_d' 。

降低电压升高的有效措施是装并联电抗器。其数量、容量和位置经计算确定。

(2) 切空载线路过电压及限制措施。切空载线路, 断路器灭弧触头间产生电弧。当电容电流过零点时, 电弧被切断, 此时, 线路电压为最高运行相电压幅值 $-U_p$ (或 $+U_p$)。经过半周, 触头间的恢复电压达 $2U_p$, 此时, 若灭弧介质恢复强度低于恢复电压, 则发生重燃, 线路上的稳态电压幅值要从 $-U_p$ (或 $+U_p$) 过渡到 $+U_p$ (或 $-U_p$), 因而发生振荡, 线路上的电压理论上可达到 $+3U_p$ (或 $-3U_p$)。若第二次灭弧后, 在经半周又重燃, 线路电压理论上可达 $-5U_p$ (或 $+5U_p$)。如此循环下去, 线路电压可达很高的值。但实际情况, 熄弧不一定在高频电流第一次过零时, 重燃也不一定发

生在电源电压最大值的情况, 而导线电晕和电阻损耗都会降低振荡电压的幅值。故多次重燃, 过电压也会有一定限度。大量实测表明, 切断空载线路的过电压值, 对中性点不接地电网一般不超过 $3.5 \sim 4 U_p$, 对中性点直接接地电网一般不超过 $3 U_p$ 。

限制过电压的措施有: ①使用灭弧能力强的断路器。②在断路器触头间加分闸中值电阻。③对于长距离超高压线路装并联电抗器, 一方面降低空载长线工频电压升高, 另一方面可减小恢复电压上升速度, 可避免重燃或降低重燃时的过电压。④用避雷器保护。

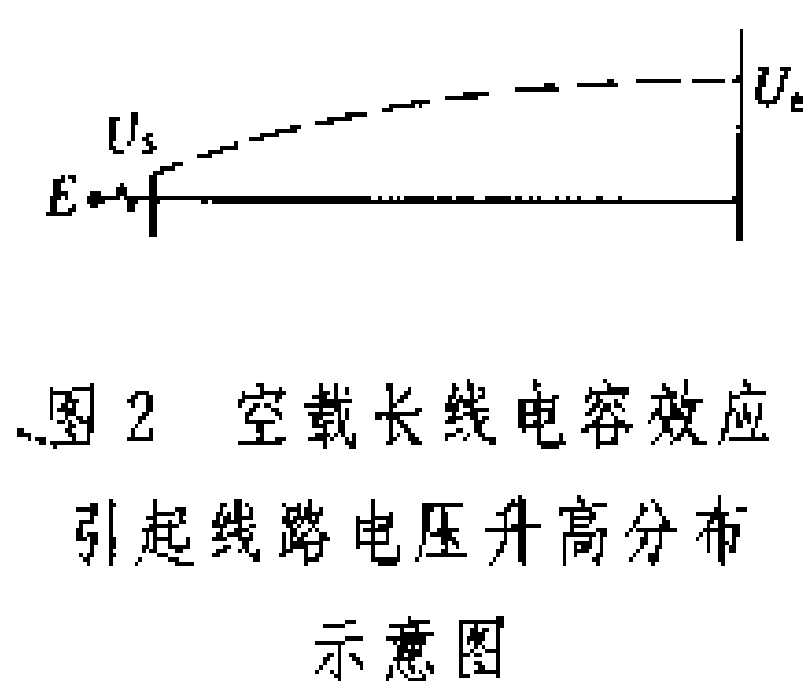
(3) 切空载变压器过电压保护。切空载变压器时, 数值很小的励磁电流可能在非零点时被切断, 变压器电感、电容上贮存的能量产生振荡, 引起过电压。过电压值, 中性点直接接地电网中一般不超过 $3 U_p$, 非直接接地电网中一般不超过 $4 U_p$ 。可采用避雷器保护。

(4) 中性点不接地系统弧光接地过电压保护。中性点不接地电网发生单相弧光接地, 流过故障点电流为电容电流, 当其超过一定数值弧光就不易熄灭。又因电容电流不大, 电弧工作不稳定, 形成间接性电弧, 导致电磁能强烈振荡, 所产生的过电压, 一般不超过 $3 U_p$, 最大值为 $3.5 U_p$ 。对接地电流超过 30A 的 3~10 kV 电网, 超过 10 A 的 35 kV 电网, 在变压器中性点装消弧线圈进行补偿, 消除间歇性电弧, 避免产生过电压。对于中性点不接地的发电机电压系统, 为避免烧损定子铁芯, 电容电流超过一定数值时, 即需在发电机中性点装消弧线圈。

(5) 参数谐振过电压及限制措施。水电站有可能产生参数谐振过电压, 如发电机自励磁过电压和铁磁谐振过电压。前者因水轮发电机电抗周期性变化而产生, 后者因磁饱和而产生。

水轮发电机在不同运行条件下, 其同步电抗在 $x_d \sim x_q$ 间或 $x_d' \sim x_q$ 间变化, 如发电机的外电路具有容抗性质, 且配合得当, 即使励磁电流很小也可激发参数谐振过电压, 使电流和端电压的幅值急剧上升。由于发电机和变压器磁路饱和的限制, 过电压幅值一般不超过 $1.5 \sim 2 U_p$ 。限制措施有: ①使发电机容量大于空载线路的充电容量, 以避免产生自励磁。②采用快速励磁限制同步自励磁过电压。③超高压电网中的并联电抗器, 选择适当容量, 也可用以消除自励磁过电压。

(6) 铁磁谐振过电压及其限制措施。带铁芯的电感 L 与电容 C 组成的串联回路中, 当铁芯尚未饱和时, $\omega L_0 > 1/\omega C$, 回路呈感性。增大外加电压, 回路中电流也相应增大, 铁芯逐步饱和。当外加电压略大于临界电压时, 运行点就发生跃变, 经过谐振点到达谐振区 (容性区) 运行, 发生过电压。图 3 中, a 为临界点, U_c 为临界电压, 外加电压超过 U_c , 电流超过 I_c 后, 进入了





不稳定区,运行点跃变到c点。这种现象也称“反倾”现象。

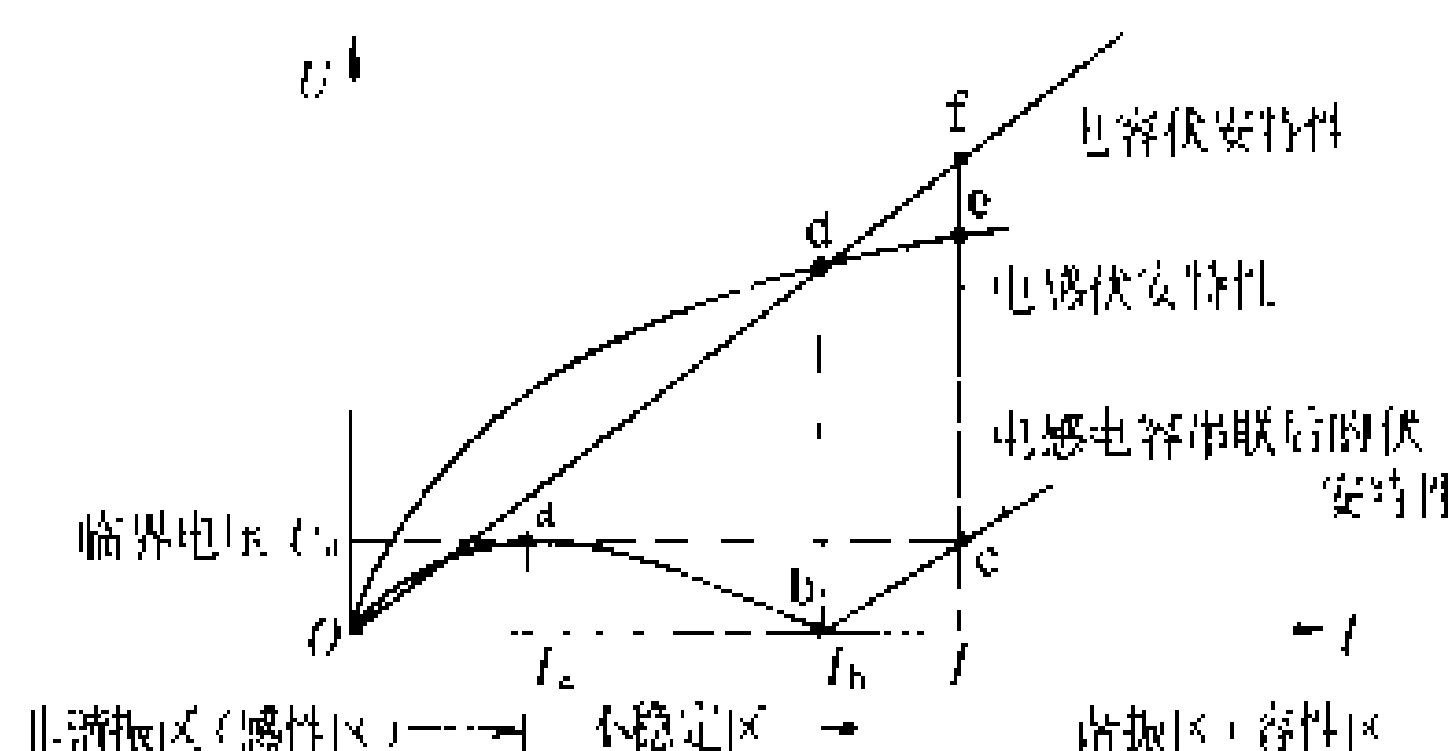


图3 铁磁谐振特性曲线

铁磁谐振既可发生在基波,也可发生在 k 次谐波,回路的未饱和电感、电容参数满足下式,是必要条件,即

$$k\omega L_0 > 1/k\omega C \quad (4)$$

式中 ω 为基波角频率,rad/s; L_0 为未饱和电感,H; C 为电容,F; k 为谐波次数, $k=1/3, 1/2, 1, 2, 3\cdots$ 。

铁磁谐振过电压的幅值,一般不超过 $2.5U_p$,很少到 $3.5U_p$,但持续时间较长,对电网危害较大,要采取措施尽量避免铁磁谐振的发生。

铁磁谐振的实例如:中性点不接地系统中,断路器突然合闸或瞬间故障接地,使单相或两相对地电压升高,电压互感器(其中性点接地)的铁芯因励磁涌流而饱和,当未饱和电感 L_0 和回路中的导线、母线等对地杂散电容 C 满足式(4)就可能产生 k 次谐波谐振,引起铁磁谐振过电压。可采取的措施有:在接成开口三角的绕组的回路内串入电阻,以阻尼铁磁谐振;增大母线对地电容,使 $x_C/x_L < 0.01$,以避免产生铁磁谐振等。

(黄贤鉴)

shuidianzhan ji-dian shebei yunxing guanli

水电站机电设备运行管理 (operation management of mechanical and electrical equipment in hydropower station) 为了使水电站

安全经济稳定运行,各国对机电设备的管理工作随着技术发展水平的不同而有所差异。有的水电站采用无人值班的方式,对机电设备运行情况进行在线监测,通过各种诊断或检测设备或仪器,由计算机或微处理机对机电设备主要特性数据进行打印,技术人员进行定期分析,据此决定对机电设备进行维修或更新,以保证机电设备处于最佳状况。

中国的水电站大部分采用有人值班方式,其机电设备运行技术管理工作,可分为以下几个方面:①定时对水电站机电设备运行情况进行测试。②定时对机电设备进行巡回检查。③定期对机电设备进行预防性试

验。④定期对水电站机电设备进行大小修。中国也有部分大中型水电站已实现计算机监控,对机电设备运行参数进行采集、处理、打印记录,供运行人员定期分析。

定时测试 一般每班分两次对机电设备运行主要技术性能进行测试与分析。水轮发电机各部温度的测试,主要是定子绕组、铁芯温度,各导轴承轴瓦温度和油槽温度,冷却器进出口空气温度,各部位冷却水运行水压。主变压器上部温度以及厂用变压器、励磁变压器的温度测定。同时,对水轮发电机组各导轴承沿轴X、Y方向进行摆度测定。温度与摆度测定是检验机组是否安全稳定运行主要性能之一。此外,对水轮发电机轴电压进行测定(见水轮发电机轴电流),是检验分析轴绝缘是否良好状态的必要手段。此外,还有水轮机水压脉动等参数。

定时巡回检查 一般每班一次由值班员对机电设备进行巡回检查,主要是检查水轮发电机组振动以及机组的摆度、异音、异味。励磁炭刷有无火花现象,各导轴承油面情况,水轮机室止水盘振漏水情况;调速器油压装置油面、油压,导水叶开度指示位置;断路器油面或气压情况。

定期预防性试验 水电站机电设备按部颁预防性试验规程进行定期测定,可以早期发现设备缺陷,是确保机电设备安全运行重要措施,主要是水轮发电机绝缘电阻漏泄电流,变压器绝缘的介质损耗因数,油耐压,绝缘油色谱分析;断路器绝缘的介质损耗因数测定;避雷器的绝缘电阻及漏泄电流的测定;机电设备的耐压试验。

定期大小修 中国规定水轮发电机组一般小修一年1~2次,大修3~5年一次,其他机电设备结合水轮发电机组大小修进行。主变压器是一年小修1次,大修则10年1次。至于大小修项目按各水电站制订的检修规程进行。

(黄宝范)

shuidianzhan jisuanji fuzhu sheji

水电站计算机辅助设计 (computer aided design for hydropower station) 设计人员使用以电子计算机为主的专门系统辅助完成水电站设计的技术,简称水电站CAD。

水电站CAD所使用的计算机系统,由硬件和软件两部分组成。

硬件部分包括主机、图形设备、输入设备和输出设备。其中主机多为工作站或个人机(PC机),由于CAD系统要进行大量计算工作和图形处理工作,因此要求大容量存储,高速运算和图形处理的功能以及较强的

通信功能。图形设备包括高分辨率的显示器和一些专用硬设备,如字符产生器、矢量发生器、图形档案存储器等;输入设备有带光笔的图形显示器、数字化仪、图形输入器、键盘和鼠标等;输出设备有打印机、绘图仪等。

软件部分包括计算机系统软件,CAD 支撑软件和 CAD 应用软件,其中计算机系统软件包括操作系统、语言处理系统和服务性软件。用户通过它们才能充分而有效地使用计算机的各种资源并发挥它的功能。CAD 支撑软件能使用户方便地运行 CAD 程序。CAD 支撑软件包括 CAD 管理程序,二维或三维图形处理软件包,向用户提供的操作级语言,数据库管理程序和计算机模拟程序等。常用的个人微机上的 Auto CAD 系统就是这种支撑软件之一。CAD 应用软件是设计人员利用计算机和相应的系统软件所编制的用来直接解决实际问题的软件。如天津勘测设计院所编制的厂房 CAD 就是用于水电站厂房设计的 CAD 应用软件。

水电站 CAD 软件的类型

(1) 水电站 CAD 软件系统按其使用方式可分为:检索型系统、计算型系统和人机交互型系统三类。

检索型系统是预先把某些定型工程的图纸,典型设计和标准及加工用的信息存入数据库(Data Base),当用户需要某种设计方案时可输入一些参数,本系统便会选出相应的或近似的标准规格图纸,再通过一系列类比,选择或少量修改便可得到所需的或接近所需的设计方案。它的特点是生成图纸较快。

计算型系统重点是由技术和经济两方面考虑设计优化,第一步进行计算分析,如大坝应力分析,一般采用有限元法、试载荷法或其他方法。第二步再根据应力条件、安全系数、大坝体积等因素进行经济和其他性能指标的分析并进行优选或用数学方法优化,以获得满意结果。此外,此系统在计算开始之前可自动生成几何模型并剖分网格形成输入文件,在计算完成之后可自动把结果用图形显示出来,必要时由绘图机输出设计图纸和设计文件。

人机交互型系统是当给定设计参数后,它便产生一个初步的设计图形,设计人员可用键盘、鼠标、显示器和数字化仪等设施对此图形进行修改,补充来逐步完善。此系统应有一个易学易用的对话语言,同时在显示器的屏幕上不断给出各种操作名称与其功能的提示(俗称菜单)。人们可选择菜单上的操作来修改或补充设计图形,直到满足或接近设计的要求条件。它的优点是在工作中可充分发挥设计人员的才智。

以上三种类型系统的界限不是绝对的,它们各有各的特色,又是相互交叉渗透的。

(2) 水电站 CAD 软件系统,按其软件结构之不同

又可分为单功能 CAD 系统、基于元件管理方式的多功能 CAD 系统和基于工程数据库技术的集成化 CAD 系统三类。

单功能 CAD 系统是只完成单一任务的 CAD 系统。如西北勘测设计研究院的混凝土坝施工详图 CAD 就是这种单功能 CAD 系统。

基于文件管理方式的多功能 CAD 系统是由许多单功能 CAD 系统通过文件管理方式联接起来所构成的统一系统,它可保证数据和各阶段成果的一致性和完整性,并有较高的效率。

基于工程数据库技术的集成化 CAD 系统是以工程数据库为核心的具有层次结构的系统,由于数据占用空间大大减少,数据结构合理,所以有更高的效率和可靠性。

发展简史

CAD 技术的产生和发展迄今只有大约 30 年时间。20 世纪 60 年代初期,随着计算机硬件和计算机技术的发展,CAD 技术才开始起步。最初它只是在飞机、汽车制造方面和电气线路设计方面做一些外形设计和制图等工作。随着软件的发展,CAD 技术又深入到分析计算和优化、决策等方面,并能输出设计文件和图纸,同时其应用范围也已扩展到土木、建筑和水电工程方面。20 世纪 70 年代初期,美国推出集成土木工程系统软件(ICES),1972 年英国推出工程系统应用软件(GENESYS),使 CAD 技术在土木、建筑方面应用更为广泛,70 年代后期,美国垦务局(United States Bureau of Reclamation, USBR),加拿大不列颠哥伦比亚水电局(British Columbia Hydropower Authority, B C Hydro)等单位都逐步开展 CAD 技术在水电工程中的应用。中国的水电站 CAD 工作则是 1984 年开始陆续引进了一些小型微机和工作站之后才起步的,起初只是在微机上将 Auto CAD 等软件应用于电气和建筑。1986 年后陆续开发了厂房、大坝和闸门等方面的 CAD 软件,到 1992 年 12 月,全国水电设计系统已完成 12 个应用于水电站各专业的 CAD 软件,大大提高了相应设计工作的效率,如中南勘测设计研究院开发的拱坝 CAD 系统,可用于水电工程的可行性设计和初步设计工作中,节省人力,投资和时间,提高工作效率约 15 倍。

(范元勋)

shuidianzhan jisuanji jiankong xitong

水电站计算机监控系统 (computerized supervisory and control system for hydropower station)

利用计算机对水电站生产过程进行自动监测、控制的技术。它使水电站自动化进入一个新阶

段,进一步提高水电站的安全运行性能、发送电能的质量和运行经济效益。水电站计算机监控系统原理框图见图1。

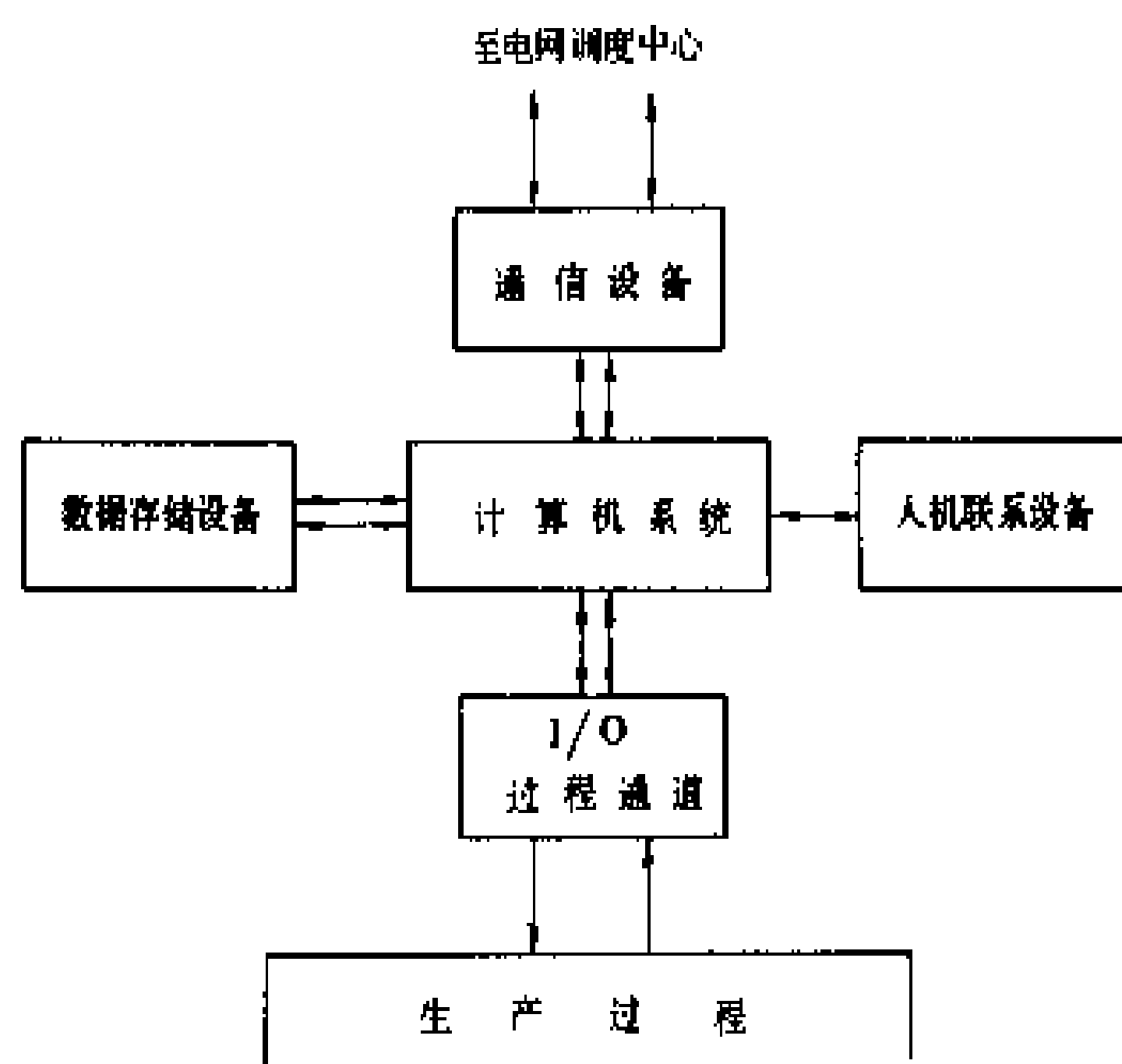


图1 水电站计算机监控系统原理框图

计算机系统通过输入/输出(I/O)过程通道,从水电站生产过程中取得电气量(例如电压、电流、功率)、非电气量(例如水位、温度、压力、位移)和状态量(例如断路器状态、继电保护触点状态)等的实时数据,经运算分析,做出调节和控制决策,并通过I/O过程通道作用于水电站的调节和控制装置,实现对水电站主要设备的自动调节和控制,例如水轮发电机组的起停和有功(无功)的调节、闸门的开闭、断路器的合跳以及隔离开关的投切等。通过通信设备,计算机系统可将水电站的实时运行参数和主设备的运行状态传送到电网调度中心,同时也可接收电网调度中心的调度命令,改变水电站的运行方式和设备的运行参数。另一方面,通过人机联系设备,如彩色屏幕显示器和打印机等,以图形显示和打印记录等形式,为运行值班人员提供和记录水电站运行的实时情况。电站运行值班人员也可通过人机联系设备,例如操作键盘和彩色屏幕显示器,以人机对话的方式,对电站生产进行人工控制及调节等操作。

水电站计算机监控系统通常有两种应用模式,即计算机为辅监控系统(Computer Aided Supervisory Control System, CASC)和计算机为主监控系统(Computer Based Supervisory Control System, CBSC)。前者,水电站运行以常规监控设备为主,计算机系统辅助完成某些监测功能(例如数据采集、画面显示、制表打印等)以及常规监控设备难以实现的一些功能(例如事件记录和优化运行计算等)。后者,水电站主要监控功能全部由计算机系统完成,有时还设置局部的、简化的常规监控设备,作为计算机系统故障时的紧急备用。

由于计算机具有高速的运算能力,可实时在线进行复杂的机组优化发电计算,闭环控制和调整发电机组的有功和无功出力,实现电站经济安全运行。理论计算和国内外经验表明,水库优化调节可增加发电量约3%,电站开停机优化组合和最佳负荷分配可增加发电量约1%。计算机能快速检测大量运行设备参数和状态,可随时发现设备运行中的异常或故障情况,避免或减少事故的发生,从而提高电站安全运行性能。

水电站计算机监控系统的性能,主要决定于功能设置、结构形式以及硬件和软件的配置。上述三方面,通常是根据电站的规模(包括单机容量和机组台数)及电站在电力系统中的地位等因素决定的。

对于不同类型的水电站,计算机监控系统的功能有所不同,一般来说应有以下功能的部分或全部,包括:①电站主设备运行参数与状态监测;②画面显示;③制表打印;④历史数据存储;⑤人机联系;⑥自动发电控制(AGC);⑦自动电压控制(AVC);⑧事件顺序记录;⑨事故追忆

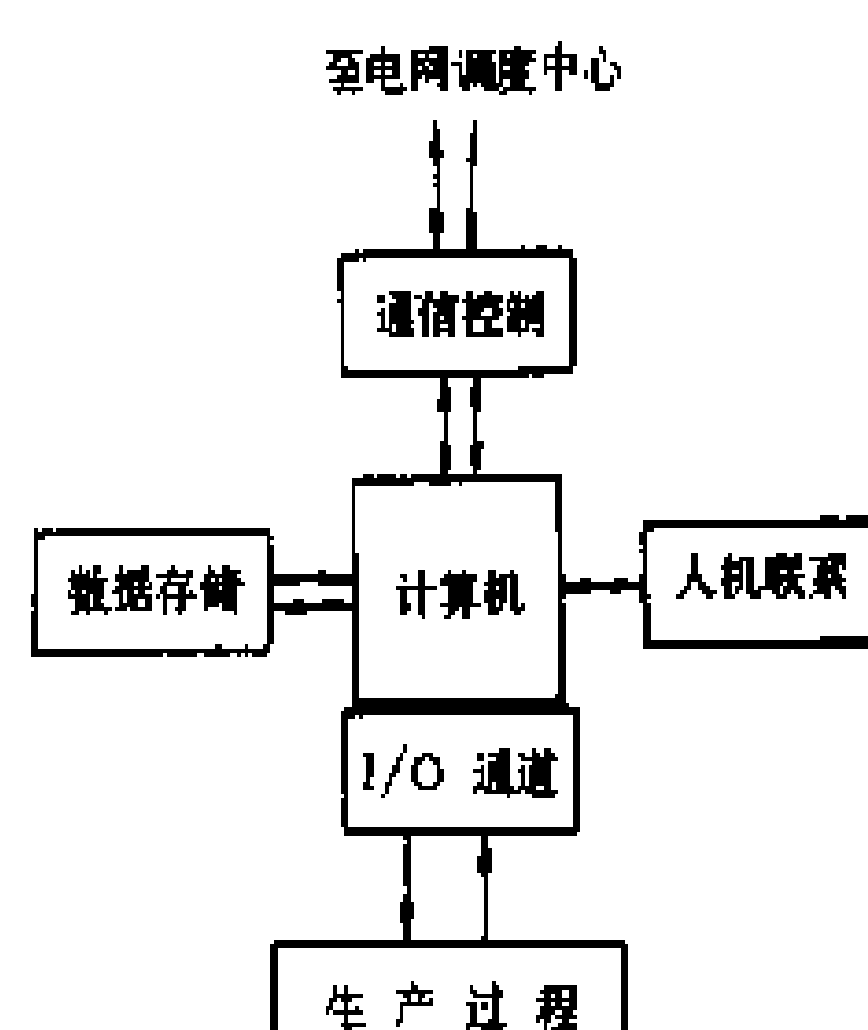


图2 集中式监控系统框图

和相关量记录;⑩典型操作指导;⑪典型事故处理指导;⑫数据通信;⑬系统自检等。

水电站计算机监控系统结构,主要分为集中式和分布式两种。集中式计算机监控系统,用一台计算机(或者加备用计算机)直接监测控制全站生产过程,适用于规模较小的中、小型水电站,其框图见图2。分布式计算机监控系统有两类,其一为星形接线,由一台计算机(或者加备用计算机)作为中央控制级的主机,各生产单元都有自己的监控计算机形成单元控制级,各单元监控机直接与主机联系(见图3)。其二为总线型接线,主机与单元监控机用总线连接(见图4)。

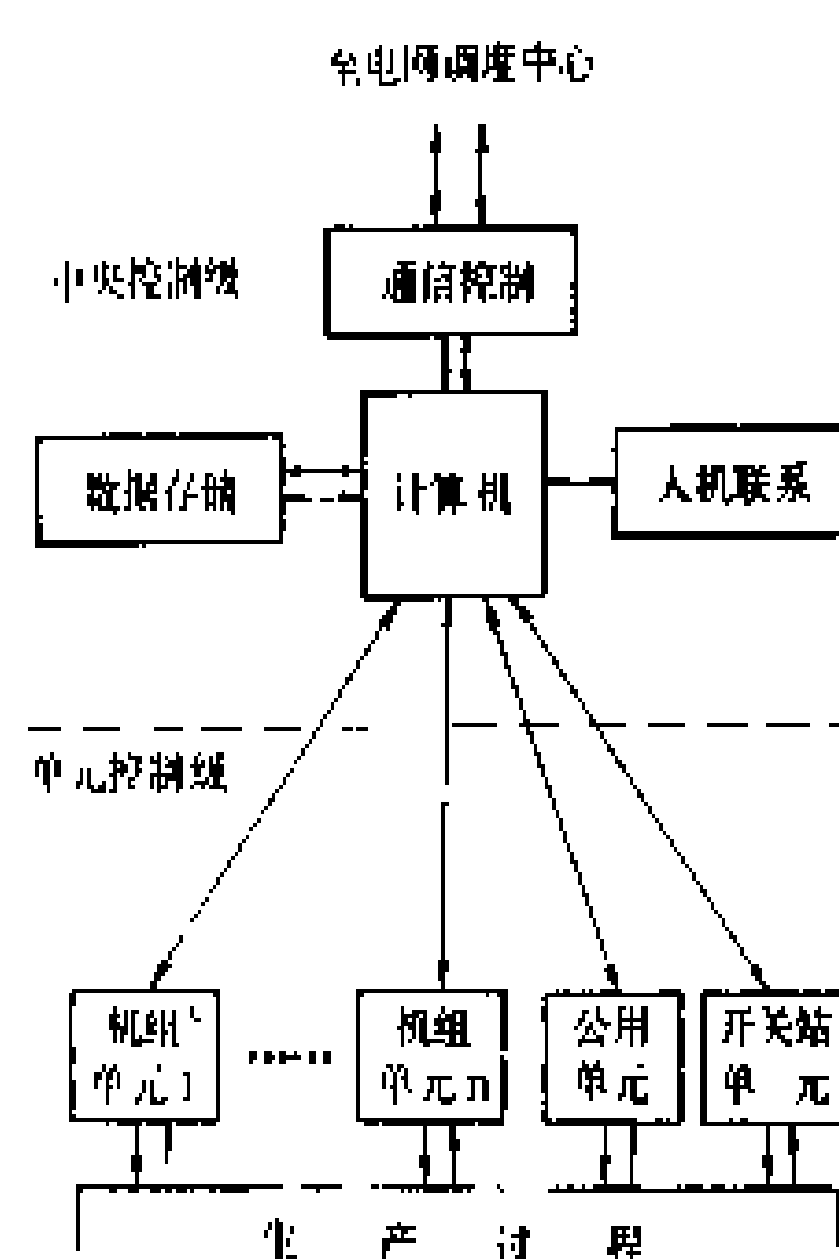


图3 分布式监控系统
(星形型)框图

监控机用总线连接(见图4)。

水电站计算机监控系统的功能 其功能内容分述如下。

(1) 电站主设备运行参数与状态监测。计算机监控系统通过各类变送器和设备状态触点, 周期地采集电站运行设备的参数和状态, 经分析处理后, 按要求存放于系统实时数据库, 供各功能程序模块 (例如画面显示、制表打印、优化计算等) 调用。当有运行参数超越 (或恢复) 限值, 设备发生故障或运行状态异常, 则立即发出报警信息, 由彩色屏幕显示器显示, 打印机打印记录。

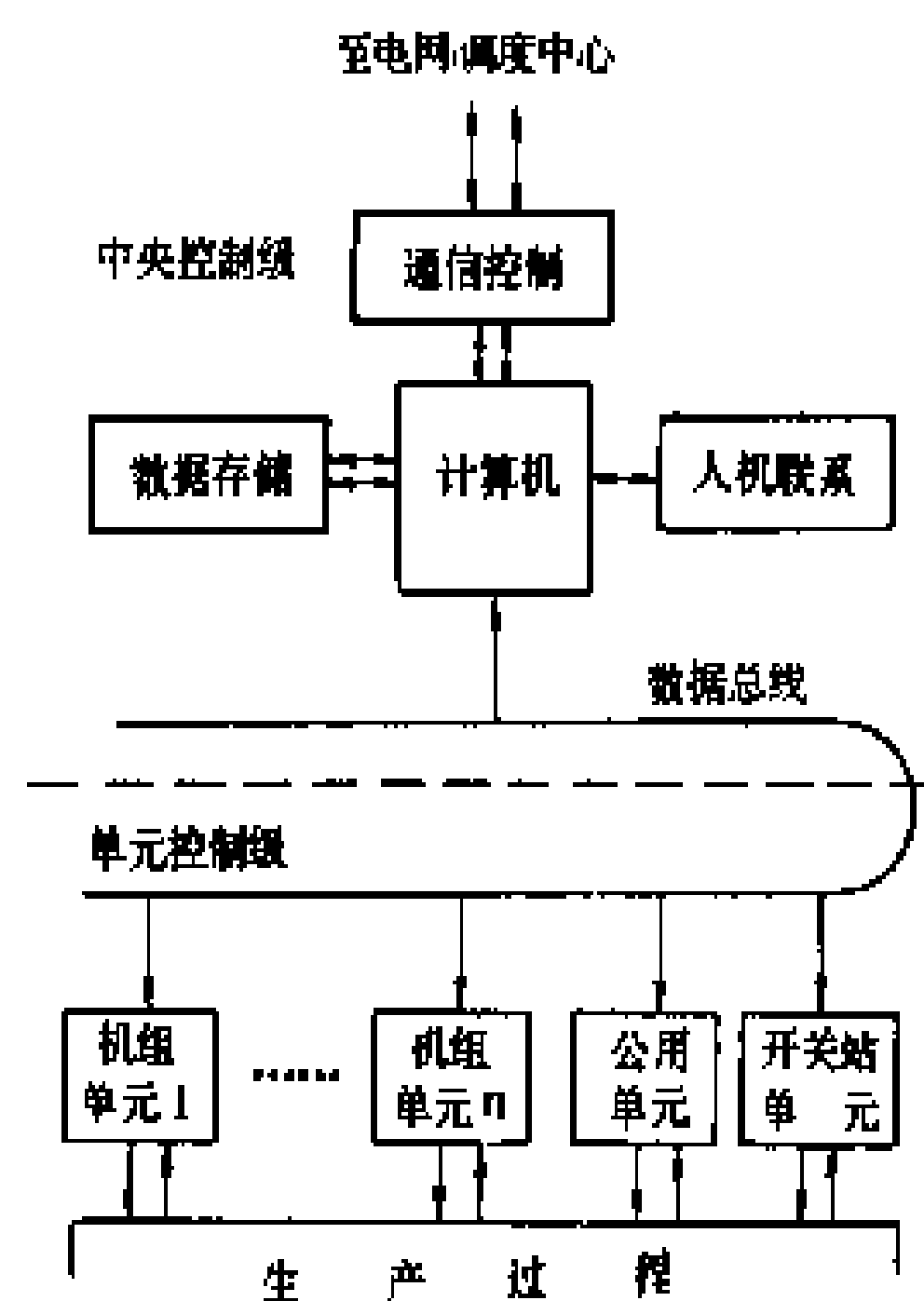


图4 分布式监控系统
(总线型) 框图

采集的主要参数和状态数据类型有: ①电量模拟量有电流、电压、有功功率和无功功率等。②非电量模拟量有温度、压力、位移等。③数字量有频率、水位等。④脉冲量有功电量、无功电量和水量等。⑤状态量有断路器、隔离开关和其他自动化设备投、切状态触点, 水轮发电机组起停过程控制设备状态触点和各种保护继电器动作 (复原) 状态触点等。

(2) 画面显示。通过彩色屏幕显示器, 以画面的形式反应电站的运行情况。常用的画面有电站运行主接线、各类数据表、操作控制画面、报警及操作提示语句等。画面可通过操作键盘召唤调看, 也可在故障时自动推出。

(3) 制表打印。按电站运行规定的要求, 将电站运行参数自动定时制成各种报表并打印记录下来, 如运行日志、操作记录、报警记录和事件顺序记录等。这些数据报表或记录, 也可由运行值班人员通过操作键盘随时召唤打印。

(4) 历史数据存储。对于需要较长时间保存的电站及其设备的某些运行数据, 例如电站事故状态及过程记录、设备运行小时、开关设备动作次数等, 加以自动分类保存, 并可随时调出。

(5) 人机联系。运行值班人员通过计算机系统外部设备了解和干预电站的生产过程。常用的人机联系设备是计算机控制终端和系统操作控制台输入输出设备, 包括操作键盘、鼠标器、光笔和跟踪球等输入器件,

彩色屏幕显示器和打印机等输出器件。

(6) 自动发电控制 (AGC)。其内容包括: 按电网调度的发电要求, 设置电站的运行方式; 在给定全站总功率的情况下, 进行优化运行计算, 包括根据机组效率特性及安全运行约束条件, 确定机组参加运行台数及最佳组合方式, 并在运行机组间进行最优负荷分配计算; 按计算结果自动调整各机组负荷, 自动实现开停机操作; 并可按要求进行自动频率偏差调整等。(见水电站自动发电控制)

(7) 自动电压控制 (AVC)。其内容包括: 按电网的要求, 自动调整电站的无功功率, 保持电站高压母线电压在规定的范围之内; 按经济原则分配机组间的无功功率。(见水电站自动电压控制)

(8) 事件顺序记录。电站发生事故或设备进行操作时, 监控系统以最快的响应速度将机组开停、断路器投切和保护继电器触点状态改变的顺序记录下来, 供分析事故之用。

(9) 事故追忆和相关量记录。当电站发生事故或设备发生异常时, 其运行参数会发生较大的变化, 计算机将与事故或异常相关的一些量, 在事故或异常发生前后一段时间内, 以常速或加速采集的方式同步记录, 供运行人员对事故或异常运行工况原因进行分析。

(10) 典型操作指导。对于电站的某些典型操作, 事先将其操作方法和步骤存于计算机内, 当要进行某项操作时, 可自动或人工召唤调出, 结合当时电站的运行情况, 形成显示画面, 指导运行人员进行操作。

(11) 典型事故处理指导。计算机事先存有电站有关典型事故的处理方法, 一旦事故发生, 即自动推出相应的画面, 指导运行人员进行处理。典型事故处理方法是运行人员和专家经验的总结。

(12) 数据通信。在水电站监控系统中, 数据通信包括系统内部的实时数据及命令的传送、外部与电网调度或地区调度以及其他有关方面的信息交换。系统内部通信, 常用星形或总线的结构型式, 采用抗干扰性能强的屏蔽双绞线、同轴电缆或光缆作通信介质, 使用实时性较高的专用通信规约。系统与外部的通信则常用电力线载波和微波方式, 使用较为通用的通信规约。

(13) 系统自检。监控系统对自身的设备, 包括硬件和软件, 定时进行检测, 发现故障时立即报警提示或作自动处理, 例如切换某个部件或中止某个任务的执行等。常设的功能有: 计算机内存自检、外部设备检查、通信通道检测、I/O 过程通道故障检测、软件看门狗和双机系统故障检测及自动切换等。

水电站计算机监控系统结构模式 监控系统结构, 通常有两种模式, 即集中式与分布式。

(1) 集中式结构 (见图 2)。一般用于机组台数较少、容量较小的中小型水电站, 系统设置一台主控计算机, 配备有人机联系、数据存储和对外通信联系等设备。也可再设置一台备用主控机, 以提高可靠性。电站生产过程运行参数和设备运行状态等数据, 直接由主控机通过 I/O 过程通道采集, 控制调节命令由主控机发出, 经 I/O 输出通道直接作用到水轮发电机组等设备的执行机构。系统的全部功能由主控计算机集中实现。

(2) 分布式结构。常用于规模较大、机组台数较多的大中型水电站。系统一般分为两部分, 即中央控制级和单元控制级, 或称中央控制层和现地控制层。中央控制级设有一至二台主控计算机, 配备完善的人机联系设备, 实现对全电站运行状况的监视和发布控制调节命令等。单元控制级直接联系生产设备, 负责采集与处理现场数据、执行控制调节命令等, 通常根据被控对象的规模和地理位置来设置, 具有较强的独立工作能力。各水轮发电机组分设单元, 另外设开关站单元和公用设备单元等。

中央控制级与单元控制级之间的通信联系, 常用的有星形和总线两种型式, 如图 3 和图 4 所示。

水电站监控系统硬件配置 硬件因电站的不同情况和要求, 在规模和种类上有所差异, 一般有如下几种主要设备:

(1) 主控计算机。适用于工业实时过程控制的微型计算机或小型计算机。中央处理单元 (CPU) 字长 16~32 位, 内存容量 1~10 MB, 主频 5~40 MHz, 根据需要还可带有数字协处理器、通信接口等其他功能模块。

(2) 数据存储设备。除了计算机附带的内存储器 (RAM 和 ROM)、软磁盘驱动器和温盘外, 还可选用一定容量的磁带机、打印机和硬拷贝机等, 用于历史数据存储和记录。

(3) 人机联系设备。主要有操作键盘、彩色屏幕显示器、汉字打印机、显示终端和矩阵打印机等。

(4) 通信设备。通常是串行异 (同) 步通信接口及调制解调器。计算机通过这些设备与电力线载波机、微波设备或其他通信设备相连。对于信息流量很大、通信任务繁重的情况, 可配备专用的通信控制机。

(5) 内部数据传输系统。由通信接口 (例如异步接口, 网络接口等) 和数据传输通道组成。通信介质一般采用屏蔽双绞线、同轴电缆或光缆。

(6) 单元监控装置。以计算机为基础的过程监控装置。配置有工作机 (CPU 字长 8~16 位, 内存 64~512 KB, 主频 4~8 MHz)、异步通信接口或网络总线接口、I/O 输入输出过程通道、现地操作面板、现地调

试设备接口等。

(7) 输入/输出过程通道。与监控系统采集数据类型相应的各种输入输出模块, 如模拟量模块、数字量及状态量模块、脉冲量模块和开关量输出模块等。

(8) 不间断电源 (UPS)。

水电站监控系统软件配置 监控系统软件, 是系统实现监控功能的计算机程序的集合。主要可分为两大类, 即计算机系统软件和生产过程应用软件。

(1) 计算机系统软件。计算机基础软件, 用以提供用户应用软件的运行环境和开发应用软件的手段。主要有实时多任务操作系统; 系统支持软件 (包括编辑、编译、汇编、连接等开发支持软件和运行程序库、数据库等运行支持软件); 编程语言, 通常是 FORTRAN、C、PL/M、汇编等。

(2) 应用软件。用户编制的或购置的软件, 是实现电站生产过程监控功能的计算机程序。程序以模块形式组成, 每个模块完成一定的功能, 可按需要选择模块组成各种应用软件, 在实时操作系统环境下运行。应用软件按系统功能要求配置, 用户可对之进行修改或增减其内容。

配置实例 图 5 是一大型水电站计算机监控系统结构与配置图, 系统采用了分层分布式星形网络结构, 配置有双主控计算机、双数据通信通道、双套人机联系设备以及 6 台单元监控装置。实现对全厂 4 台机组及相关设备的自动监测控制。

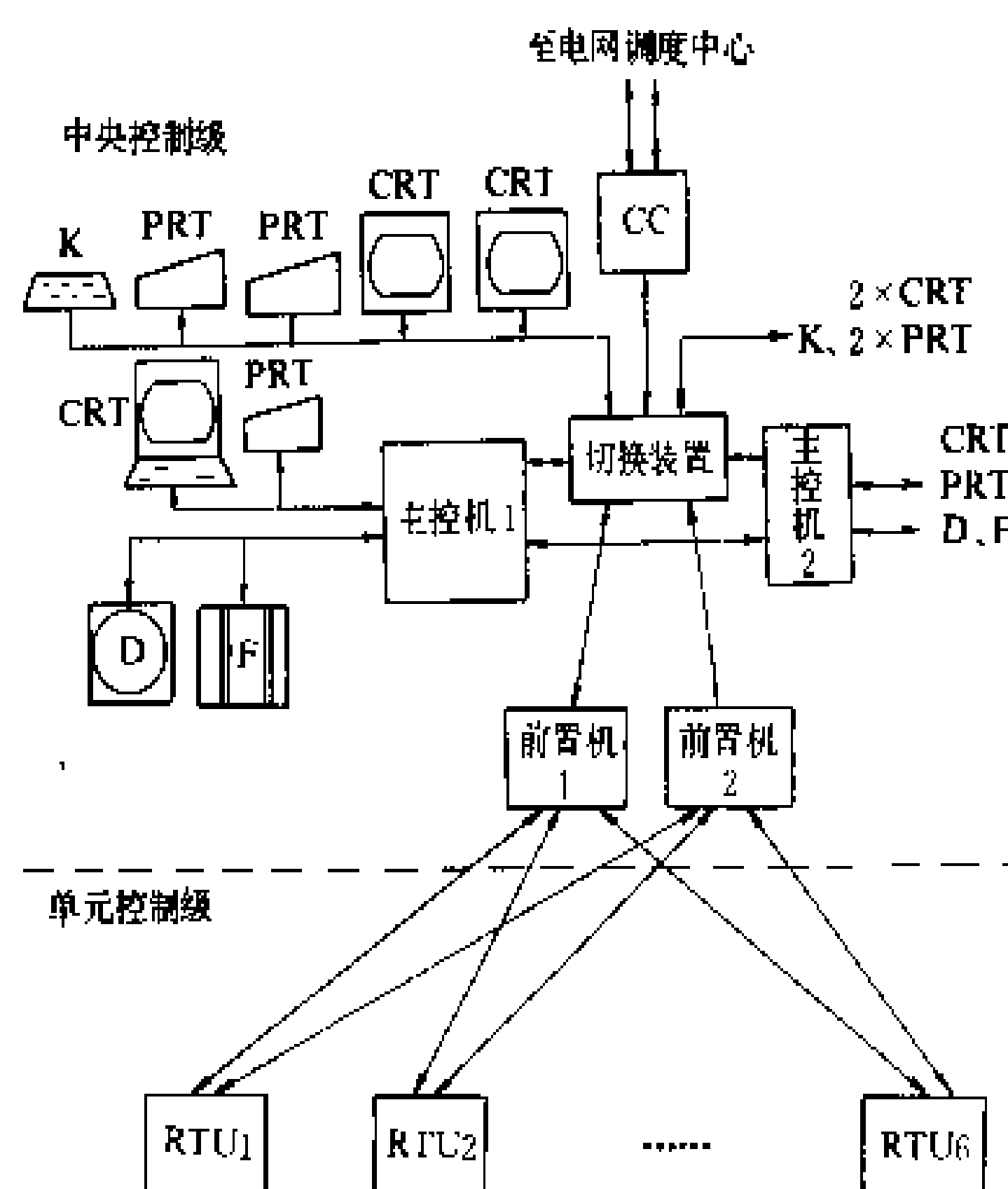


图 5 某水电站计算机监控系统结构与配置

K 操作键盘; PRT—打印机; CRT 显示器; CC—通信机; F 软磁盘; D 温盘; RTU—单元监控装置

发展简史 水电站计算机监控系统早期产品主要用于取代硬布线继电器逻辑装置, 辅助常规监控装置

实现监测控制功能。随着计算机和微处理器技术的发展,逐步形成了功能较为完善的以计算机为基础的监控系统。

较早的系统出现在 20 世纪 60 年代后期,而较完整的系统则在 70 年代中期形成。有代表性的是美国大古力水电站计算机监控系统。70 年代后期,与电网调度自动化系统发展的同时,计算机监控系统在水电站的应用得到了进一步的发展,如加拿大魁北克水电局所属水电站,法国罗纳河水电站群等都实现了计算机控制。80 年代初期,许多国家研制成了以微处理器和过程计算机为基础的水电站计算机监控系统成套产品。系统的研制着重于:①增强功能,提高速度、可靠性及灵活性等性能。②使用高级应用软件,例如趋势分析、AGC、AVC、优化控制等。③改善人机联系,例如采用大屏幕高密度彩色显示器和动态画面编辑等。

中国水电站计算机监控技术的应用,从 60 年代起就开始了研究试点工作,但进展不快。1984 年富春江水电站多微机分布控制系统投入运行,首先实现了计算机安全监测、事件记录和经济运行指导等重要功能。1988 年葛洲坝二江电站计算机监控系统,实现了闭环运行。现在计算机监控系统正逐渐在大中型水电站中推广应用。

(柳宇强)

shuidianzhan jiedi xitong

水电站接地系统 (earthing system for hydropower station)

保证水电站电气系统正常运行、设备安全和人身安全所需的各种接地体、接地线组成的总体。接地体包括人工接地体和自然接地体。人工接地体有垂直接地体、水平接地带和接地网。自然接地体为埋入水中或地下的钢筋混凝土的钢筋骨架或金属结构物。水电站有为数众多的自然接地体,如:水轮机的蜗壳和尾水管,各种闸门的金属结构埋件,厂房钢筋混凝土的钢筋骨架,各种地下压力钢管和钢筋混凝土管,以及施工围堰的金属板桩等。受水或潮湿土壤浸渍的混凝土,水的渗透深度通常在 0.1~1 m 左右,其电阻率十分接近水或土壤的电阻率,所以混凝土保护层内的钢筋可以作为接地体用。易燃(可燃)液体、易燃(可燃)气体等的输送管道不能作为自然接地体。水电站的所有接地体都连接成一个整体,全厂设备的接地都接在上面。

水电站的接地共有三种,即:工作接地、防雷接地和保护接地。工作接地是水电站电气设备运行所必需的接地,如发电机中性点、变压器中性点的接地都属于这类接地。防雷接地为泄放雷电流入地而设,是防雷的

一个重要组成部分,例如避雷针(线)接地冲击电阻值过高,就会降低其保护效果,或者产生过高的反击过电压,损坏设备。保护接地为保护人身安全而设,除规程规定者外,水电站中所有电气设备的机座、金属外壳、金属支架、金属防护围栏以及输电线路的金属杆塔和钢筋混凝土杆塔都要接地,以防止绝缘损坏使这些部分带电而危及人身安全。

电气设备故障接地时,接地短路电流经接地体向地中扩散,大地表面形成电位分布。沿设备外壳、围栏或架构距地面高度为 h (h 一般取 1.8 m) 的 A 点,和距设备、围栏或架构水平距离为 d (d 一般取 0.8 m) 的 B 点之间的电位差称接触电位差,人接触该两点所承受的电压称接触电压,见图 1 (a)。在上述电气设备故障接地,大地表面形成电位分布的情况下,地面上水平距离为跨步(水平距离 d) 的两点之间的电位差称跨步电位差,人体两脚接触该两点所承受的电压称跨步电压,见图 1 (b)。接触电位差和跨步电位差的允许值,对有效接地系统分别为

$$U_c = \frac{174 + 0.17\rho_s}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

和

$$U_s = \frac{147 + 0.7\rho_s}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

对非有效接地系统分别为

$$U_c = 50 + 0.05\rho_s \quad (3)$$

和

$$U_s = 50 + 0.2\rho_s \quad (4)$$

式中 U_c 、 U_s 分别为接触电位差和跨步电位差, V; ρ_s 为人脚站立处地表土壤电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; t 为接地短路电流的持续时间, s。

为降低接触电位差和跨步电位差,水电站的接地系统要构成均衡电位接地系统,即在需要的地方设置均压接地网、均压接地带,所有接地网按均压接地网的要求设计实施。

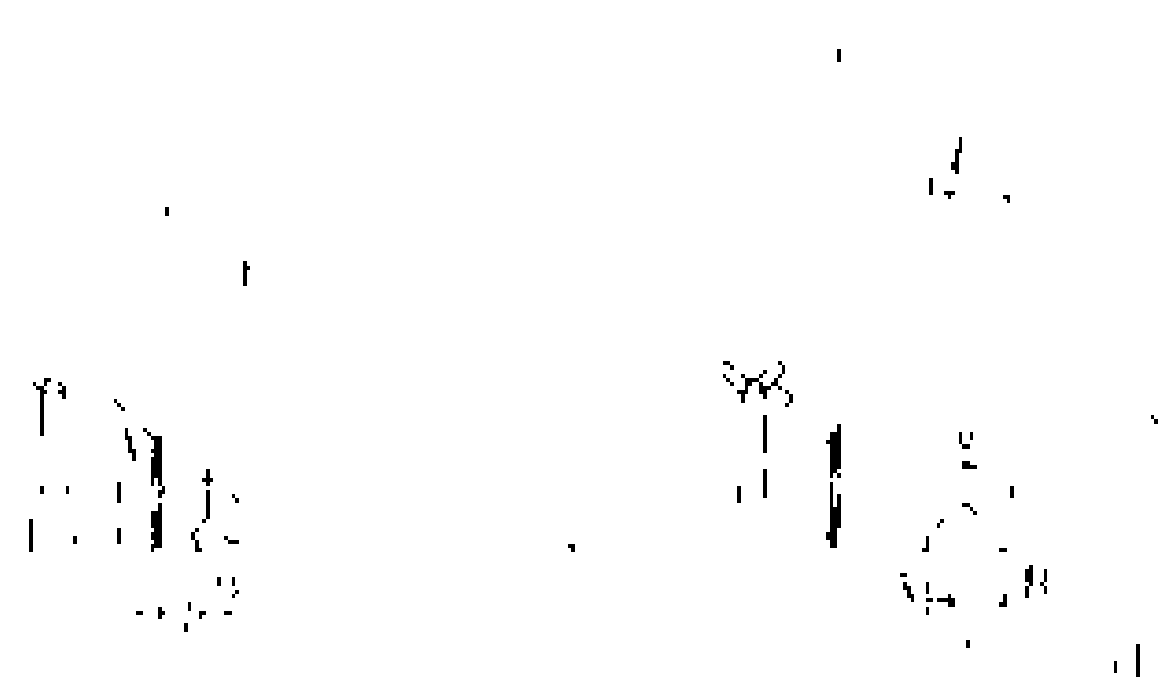


图 1 接触电位差和跨步电位差说明图

(a) 接触电位差; (b) 跨步电位差

接地电阻 为了达到接地所要达到的目的,对水电站的接地电阻的数值有一定要求。然而,水电站大都处于山地,岩石的电阻率很高,往往难于达到要求,所以要充分利用自然接地体,充分利用水作为散流介质。

水库水面下的坝面和库底,尾水渠道,都可以敷设接地网。中国采用的工频接地电阻允许值见表 1。冲击接地

得多。所以,如果深埋接地体能穿透岩层碰到地下水,就可得到好效果。中国使用的土壤和水的电阻率参考值见表 2。

表 1 工频接地电阻允许值

系统名称	接 地 装 置 特 点		接地电阻 (Ω)
有效接地 系 统	一般电阻率地区		$R \leq \frac{2000}{I}$ 或 $R \leq 0.5$
	高电阻率地区		$R \leq 5$
非有效接地 系 统	仅用于高压电力设备的接地装置		$R \leq \frac{250}{I} \leq 10$
	高压与低压电力设备共用的接地装置		$R \leq \frac{120}{I} \leq 10$
	高电阻率地区	高压和低压电力设备	$R \leq 30$
		发电厂和变电所	$R \leq 15$
低压电力 设 备	低压电力设备		$R \leq 4$
	并列运行的发电机、变压器等电力设备的总容量不超过 100kV·A 时		$R \leq 10$
	重复接地		$R = 10$
	电力设备接地电阻允许达到 10Ω 的电力网的重复接地（重复接地不少于三处）		$R \leq 30$

注: 1. I 为计算用的流经接地装置的入地短路电流(A)。
2. $R \leq 5\Omega$ 时并应符合下列要求: ①对可能将接地区的高电位引向厂、所外,或将低电位引向厂、所内的设施,应采取隔离接地电位措施;②考虑短路电流非周期分量的影响,并且当接地网电位升高时,发电厂、变电所内的 3~10kV 阀型避雷器不应动作;③设计时应验算接触电位差和跨步电位差;施工后应进行测量,并绘制电位分布曲线。
3. $R \leq 10\Omega$ 系指接零保护电力网中变压器的接地电阻。

电阻允许值没有规定,但接入主接地网的避雷针(线)和避雷器应在与主网连接处设置集中接地装置,独立避雷针(线)应校验与设备的空间距离和与设备接地体的地中距离。

接地电阻的计算方法可参阅有关专用计算手册。

土壤和水的电阻率 水电站的坝址区和厂区一般都是岩石地基,电阻率很高,为降低接地体的接地电阻,可把接地体周围的土石用低电阻率的材料置换,其作用相当于增大接地体的尺寸,对降低工频接地电阻有一定作用。置换材料应是电阻率低、性能稳定、不易流失、易于吸收和保持水分、无强烈腐蚀作用、施工简便、且经济合理的材料,如低电阻率土壤、与木炭粉混合的土壤以及降阻剂。常用的降阻剂有液态固态两种。

水的电阻率与泥土大体相当,比岩石的电阻率低

均衡电位接地和高电阻率材料覆盖地面 为降低接触电位差和跨步电位差,水电站采取均压接地网、均压接地带等均衡电位接地措施。在没有布置设备的地方,也可采用高电阻率材料覆盖地面的措施,如碎石层或沥青地面。

(1)均压接地网。由于接地网上的电位均相同,平行均压带间的电位分布曲线陡度比单独接地体的小,因而接触电位差和跨步电位差都减小,起到均压作用。网内的均压带间的间距,有均匀布置和不均匀布置两种(见图 2),不均匀布

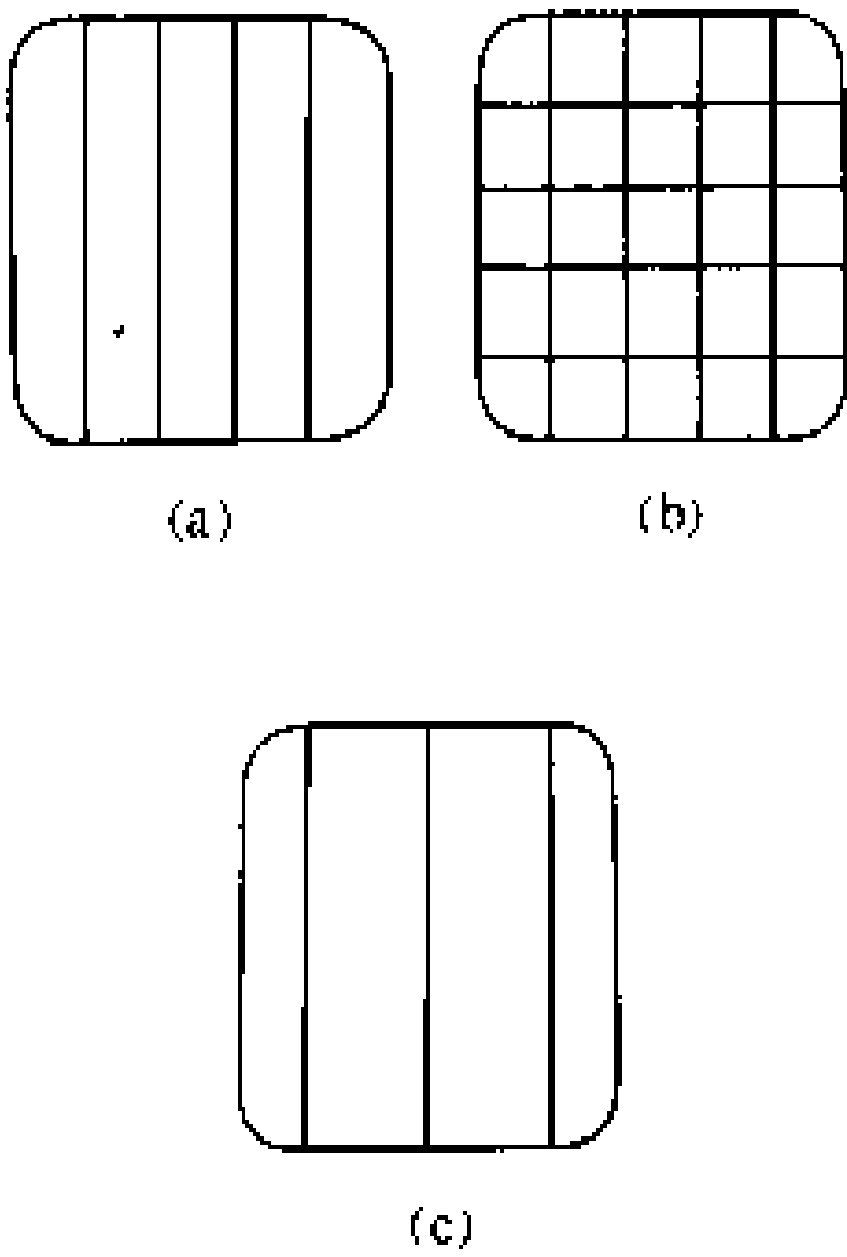


图 2 均压接地网类型示意图
(a) 等间距长孔接地网; (b) 等间距方孔接地网; (c) 不等间距长孔均压网

置的网孔电位差较均匀。

(2)设均压接地带。对于跨步电位差很高的地方,也可设均压接地带。例如,高压开关站的入口有人通行,可平行于接地网边敷设帽檐式水平接地带,其埋深

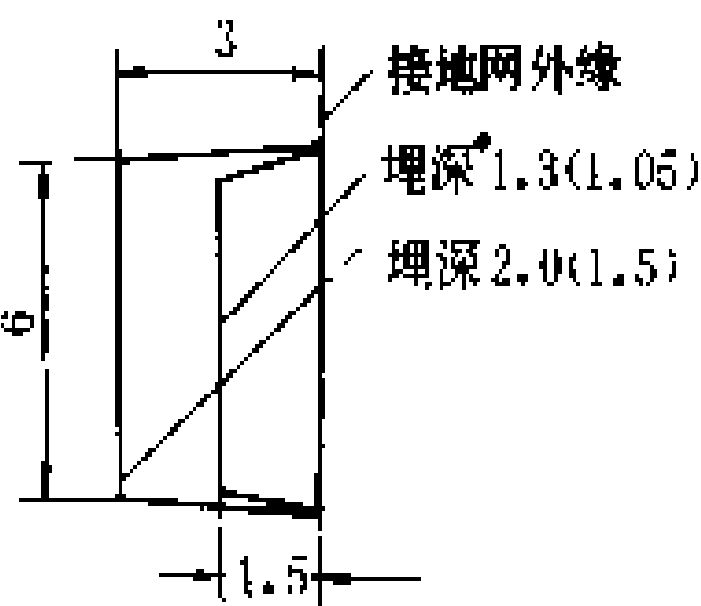


图 3 帽檐式均压带布置示意图

从网边开始逐步加深(见图 3)。图中示例,当埋深为 1.3、2.0 m 时可使跨步电位差降低约 40%;埋深为 1.05、1.5 m 时跨步电位差可降低约 20%。

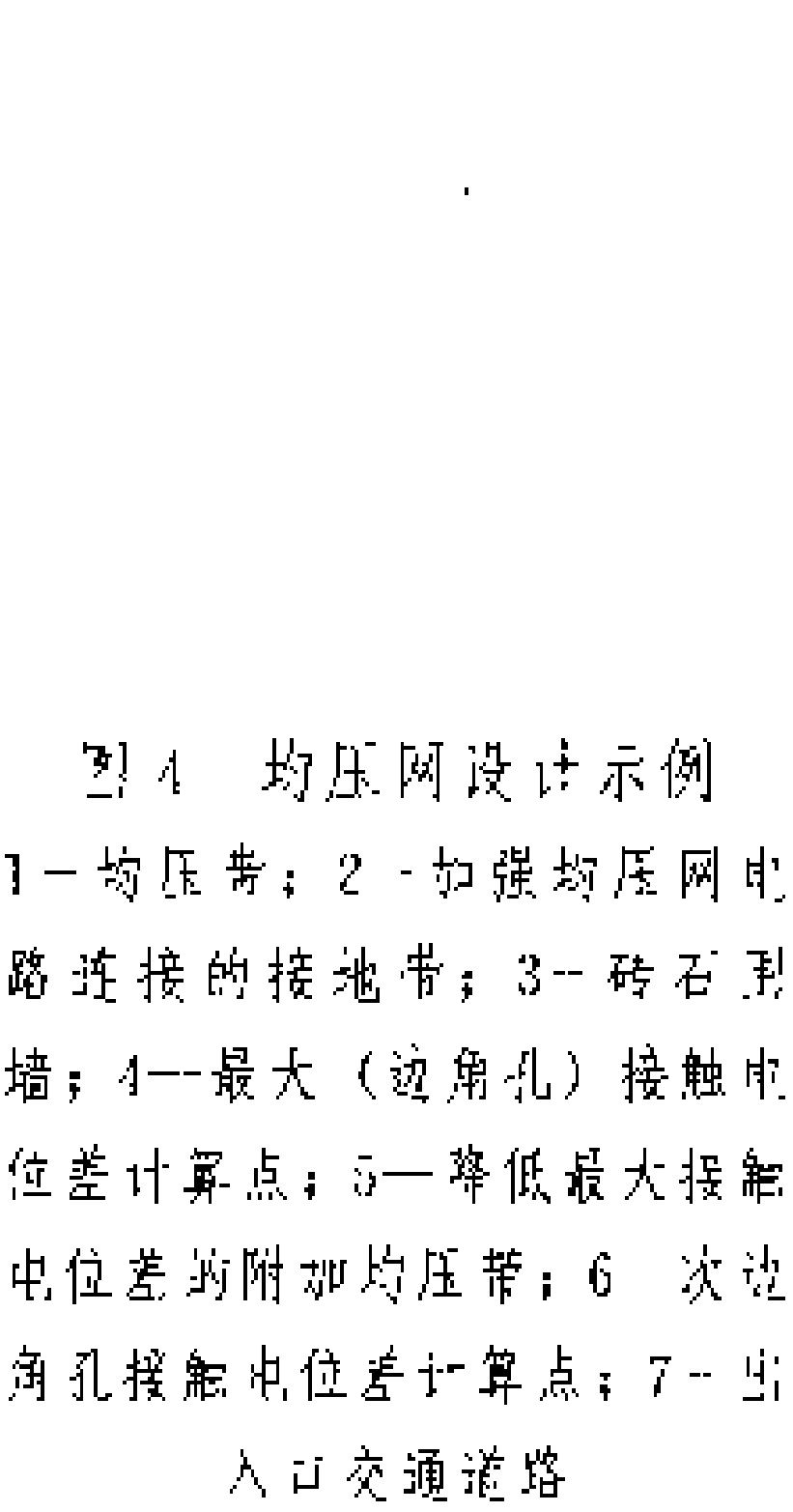
(3)铺盖高电阻率材料路面。均压接地网

内接触电位差最大的地方,在边角孔(见图 4 点 4),接

表 2 土壤和水的电阻率参考值 (Ω·m)

类别	名称		电阻率近似值	不同情况下电阻率的变化范围		
				较湿时 (多雨区)	较干时 (少雨时)	地下水含盐碱时
泥土	陶粘土		10	5~20	10~100	3~10
	泥炭、泥灰岩、沼泽地		20	10~30	50~300	3~30
	黑土、园田土、陶土、白垩土		50	30~100	50~300	10~30
	粘土		60	30~100	50~300	10~30
	砂质粘土		100	30~300	80~1000	10~30
	黄土		200	100~200	250	30
	含砂粘土、砂土		300	100~1000	1000 以上	30~100
	河滩中的砂		-	300	—	—
	煤		-	350	-	-
	多石土壤		400	-	-	-
砂	砂、砂砾		1000	250~1000	1000~2500	-
	砂层深度大于 10 m、地下水较深的草原		1000	—	-	-
	地面粘土深度不大于 1.5 m、底层多岩石		1000	—	—	—
岩石	砾石、碎石		5000	—	—	—
	多岩山地		5000	—	—	—
	花岗岩		200000	-	-	-
水	海水		1~5	-	-	-
	湖水、河水		30	—	—	—
	泥水、泥炭中的水		15~20	—	—	-
	泉水		40~50	—	—	—
	地下水		20~70	—	-	-
	泉水		50~100	-	—	—
	河水		30~600	-	-	-
其他	金属矿石		0.01~1	—	—	—
	混凝土	在水中	40~55	-	-	-
		在湿土中	100~200	-	-	-
		在干土中	500~1300	—	—	—
		在干燥的大气中	12000~18000	-	-	-
	捣碎の木炭		40	-	-	-

地网和网孔中心点的电位差即为接触电位差。为了降低边角孔的接触电位差，可加附加均压带（见图 4 中 1），或用高电阻率材料覆盖（见图 4 斜平行线区）。最大跨步电位差出现在接地网四角，且距接地网外缘距离为 $(h_p - 0.1)$ m 和 $(h_p + 0.4)$ m 的两点间（ h_p 为接地地网埋深）。这些地方如果没有布置设备但有人行走，



就可以敷设高电阻率的地面层，避免产生危险的接触电压。
(黄贤鉴)

shuidianzhan jinshuikou
水电站进水口 (intake of hydropower station) 水电站从水库或河流中取水的水工建筑物。它由进水通道和上部结构所组成。进水通道包括有进口段、闸门段和渐变段。在进口段前缘设有拦污栅。在闸门段设有事故闸门和检修闸门。在发生事故时，事故闸门能在动水中关闭，截断水流，以保证水电厂安全运行。能快速关闭的事故闸门称快速闸门。事故闸门上、下游平压后在静水中开启。位于其上游的检修闸门的启闭均需在静水中操作。进水口上部结构设有启闭

机和清污设备。

在多泥沙、多污物和寒冷地区河流上的进水口，应根据其特点和自然条件采取防治措施。进水口防沙、防污、防冰（简称“三防”）是进水口设计的重大技术问题，既要使水流平稳、进水通畅，又要有利于“三防”。

进水口按水流条件可分为深孔式进水口和开敞式进水口两种基本型式。深孔式进水口又称有压进水口，完全淹没在水面以下，进入孔口的水流无自由水面，后接有压引水道。开敞式进水口又称无压进水口，孔口上部开敞，进入孔口的水流具有自由水面，后接无压引水道。

深孔式进水口按所在的位置可分为岸式进水口、坝式进水口和塔式进水口。岸式进水口背靠水库岸边，又因闸门位置的不同分为岸坡式进水口、竖井式进水口和岸塔式进水口。

布置 进水口的设置高程和孔口尺寸，首先要保证在各级运行水位下均能引入发电所需的流量。进水口宜靠近河道主流，不宜靠近多泥沙支流和山沟出口的下游。其位置和方位应使进水口前方的水流平稳、进流顺畅，防止出现回流将漂浮物聚集在进水口前和引发有害的漏斗漩涡。尚应避免漂浮物正面冲撞进水口。进水口过水通道具有流线化的轮廓，其横剖面逐渐收缩与引水道平顺连接，使水流流速分布均匀、变化连续，不发生涡流，水头损失小。

“三防”的基本原则

(1)防治泥沙的基本原则。根据河流中推移质和悬移质的含量、粒径、硬度、比重以及泥沙运动规律和淤积形态采取以下措施：尽量将泥沙导离进水口；将推移质拦截在进水口前，再排至下游河道；将越过进水口进入引水道的悬浮质泥沙在沉沙池中沉淀下来，再从引水道中清除出去。

(2)防治污物的基本原则。根据河流污物的种类、数量和漂移的特征采取以下措施：在进水口前方水域先拦截尽量多的污物，导离进水口、排至下游河道；其余污物由进水口前缘的拦污栅拦截，及时用人工或清污机清污并运走污物。

(3)防治冰冻的基本原则。根据河流封冻和开冻规律、流冰的规模和运动特征、水库冰盖的厚度等采取以下措施：拦截流冰、导离进水口、排至下游；减轻或消除流冰对进水口的冲击压力；使水库冰盖尽量不接触进水口前缘以减轻或消除静冰压力。

开敞式进水口的“三防”措施 开敞式进水口都用于坝低库小、没有调节库容、运行水位变幅不大的水电站。这种进水口的底板高出河底不多，因此河面污物、流冰以及河底的泥沙较易堵塞进水口，甚至进入引水道和水轮机。所造成的危害，轻则减少引用流量、磨

损水轮机、增大水头损失、降低机组出力；重则中断引水、或将拦污栅压垮后，污物涌进水轮机，造成破坏。因而处理开敞式进水口三防问题十分重要也比较复杂（见开敞式进水口）。

深孔式进水口的“三防”措施 深孔式进水口用于坝高库大、有调节库容、运行水位变幅较大的水电站时，进水口淹没深度大，漂浮污物和流冰不易堵塞和进入进水口。进水口底板又高出河底甚多，而且河水流入水库后流速显著降低，所挟带泥沙多沿程沉积到库底，因而处理其三防问题比开敞式进水口简单。

深孔式进水口用于坝低库小、调节库容小、运行水位变幅不大的水电站时，进水口的淹没深度小、底板高出河底不多，其三防问题类同开敞式进水口，有时称此类进水口为浅式进水口，以示与深孔式进水口的差别。为保证进水口取水时泥沙不进入引水道，多在靠近并低于进水口处建排沙设施，定期放水拉沙，在进水口前形成冲沙漏斗以达到“门前清”的要求。如在坝式进水口设排沙底孔、岸式进水口设排沙洞。

（丁志华）

shuidianzhan jingji fenxi

水电站经济分析 (economic analysis of hydropower station)

从国民经济整体角度对水电项目进行经济评价的准则和方法。水电站经济分析应用于水电规划、水电工程经济评价和水电站主要特征值优选等。其主要内容为效益、费用和评价指标计算，敏感性分析及方案的选择。

费用和效益

(1)费用。它是国民经济所付出的资金（即投入），包括建设投资（见水电站投资）和生产期的运行费用（见水电站生产成本），不含税金、国内贷款利息和有关补贴。费用宜用影子价格。影子价格是指当社会经济处于某种最优状态下时，能够反映社会劳动消耗、资源稀缺程度和对最终产品需求情况的价格。影子价格应在宏观优化规划的基础上，分析采用。当缺乏宏观规划时，也可按市场价格修正采用，使之尽量接近其价值。在换算外汇时宜用影子汇率，即外汇的影子价格。

(2)效益。它是项目对国民经济的贡献（即产出），包括直接效益和间接效益。直接效益为发电效益和综合利用效益；间接效益是指电站建成后促进当地及供电区经济发展、生态环境改善等（见水电站效益）。经济分析，原则上应考虑全部的直接和间接效益，但实际计算中往往只算可用价格计算的直接效益。对于难于用货币量表示的其他直接效益与间接效益只能作定性分析，在方案选择中加以考虑。

关于效益计算，目前多用功能相同的合理的替代

方案的费用作为本电站的效益。对于具有综合利用效益的水电站,原则上,各部门的效益都应计算在内综合分析。若某些部门的效益难以确切用货币表示,也可先进行费用分摊,然后分部门进行经济分析评价。(见综合利用工程费用分摊)

资金的时间价值 按社会折现率,用复利的形式进行计算。费用主要有三种标准形式:①一次总付的现值费用 P ; ② n 年后一次总付的将来费用 F ; ③在 n 年中平均支付的等额年费用 A 。见图。基本公式为

$$P = F(1+i)^{-n} \text{ 以 } F(P/F, i, n) \text{ 表示} \quad (1)$$

$$F = P(1+i)^n \text{ 以 } P(F/P, i, n) \text{ 表示} \quad (2)$$

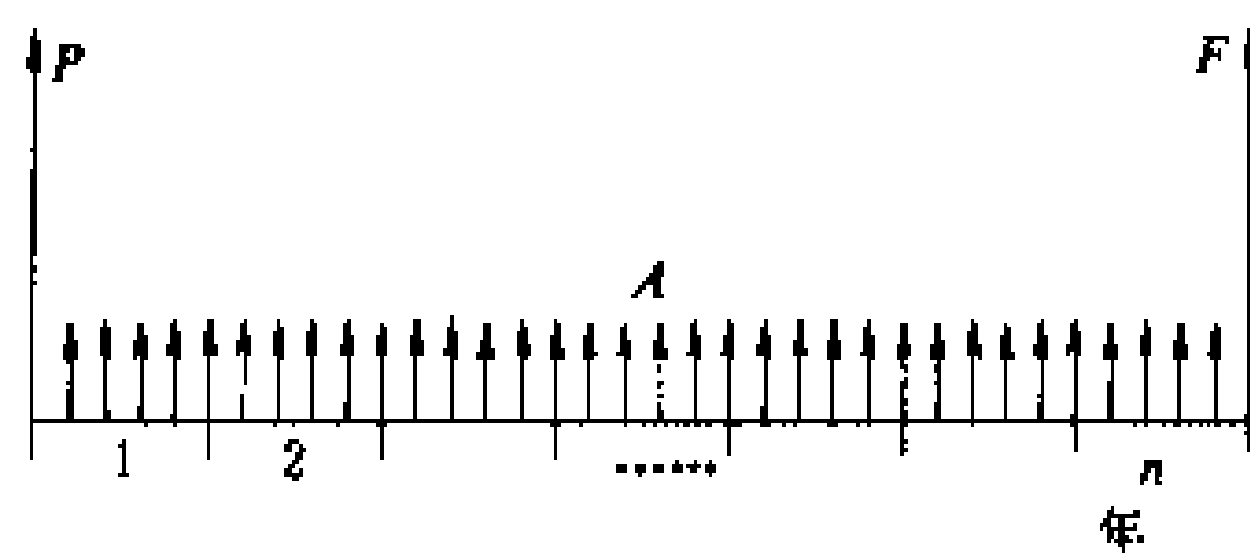
$$P = A \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \text{ 以 } A(P/A, i, n) \text{ 表示} \quad (3)$$

$$F = A \frac{(1+i)^n - 1}{i} \text{ 以 } A(F/A, i, n) \text{ 表示} \quad (4)$$

$$A = F \frac{i}{(1+i)^n - 1} \text{ 以 } F(A/F, i, n) \text{ 表示} \quad (5)$$

$$A = P \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \text{ 以 } P(A/P, i, n) \text{ 表示} \quad (6)$$

式中 i 为社会折现率, % (目前中国常用 12%), n 为计算期 (含建设期和生产期), 年 (在水电规划设计中, 一般采用 50 年)。



费用的三种标准形式

评价指标 经济内部收益率和经济净现值是两个主要评价指标。

(1) 经济内部收益率 (Economic Internal Rate of Return, EIRR)。它是反映水电站对国民经济贡献的相对指标, 是使项目计算期内净现值累计等于零时的折现率。其表达式为

$$\sum_{t=1}^n (C_t - C_0)_t (1 + \text{EIRR})^{-t} = 0 \quad (7)$$

式中 C_t 为现金流入量 (即每年的效益); C_0 为现金流出量 (即每年的费用); $(C_t - C_0)_t$ 为第 t 年的净现金流量。

$\text{EIRR} \geq 0$ 时, 项目是经济的。进行方案比较时, EIRR 越大的方案, 经济效果越好。同一工程按不同规模比较时, 应计算扩大部分的边际经济内部收益率 (ΔEIRR), 只有当它大于现行折现率时, 扩大规模的方案在经济上才是合理的。

(2) 经济净现值 (Economic Net Present Value, ENPV)。它是反映项目对国民经济贡献的绝对指标,

是用社会折现率将项目计算期内各年的净效益折算到开工第一年年年初的现值之和。其表达式为

$$\text{ENPV} = \sum_{t=1}^n (C_t - C_0)_t (1 + i)^{-t} \quad (8)$$

$\text{ENPV} \geq 0$, 项目在经济上合理可行。方案比较时, ENPV 越大的方案, 经济上越有利。

(3) 现值费用 (Present Worth, PW)。表达式为

$$\text{PW} = \sum_{t=1}^n (I + C - S - W)_t \times (P/F, i, t) \quad (9)$$

式中 I 为系统 (含一次能源开发及二次能源转换和传输各环节) 的全部投资, 包括固定资产投资、流动资金和更新改造投资; C 为年经营成本, 对于非煤电联营的火电厂, 应含燃料费用; S 为计算期末固定资产的残值; W 为计算期末回收的流动资金。

用于效益相同的方案比较, 并以现值费用最小为选用方案的准则。

(4) 等额年费用 (Annual Cost, AC)。表达式为

$$\text{AC} = \left[\sum_{t=1}^n (I + C - S - W)_t (P/F, i, t) \right] (A/P, i, n) \quad (10)$$

效果与现值费用法相同, 只是形式有差别。

敏感性分析 即不确定因素分析。经济分析中的数据, 多数来自估算和预测, 有一定的不确定性。因此要分析主要的不确定因素变化时对评价指标的影响程度, 确定项目在经济上的可靠性, 以估计项目可能承担的风险。对水电站来说, 可能发生变化的主要因素有投资、工期等。

经济分析中各种基础资料, 如枢纽方案及其工程量、投资和运行费用及能量指标等务求客观和准确, 并在同一基础上, 以免分析结果失真。

(欧阳华)

shuidianzhan jingji pingjia

水电站经济评价 (economic evaluation for hydropower station)

应用工程经济学理论, 结合水电站特点分析论证水电站经济性和财务可行性的原则和方法。目的在于寻找综合经济效益最优的水电站规划、设计和运行方案。

水电站经济评价的组成 包括经济分析和财务分析两个方面。

(1) 经济分析。从国民经济整体角度考察水电项目的经济合理性。以按社会折现率计算的系统总现值费最小或内部经济收益率大于社会折现率为选择方案的经济准则。计算期 (建设期和生产期) 内发生的费用, 均按国家规定的标准折现率, 用计算复利方法, 折算为现值。产品和原料的价格常用影子价格, 汇率用影子汇

率,以纠正现行价格与价值及现行汇率与实际汇率脱节的问题。影子价格一般有两种计算方法:①以国际市场价格为基础,考虑进出口平衡和供需平衡等因素,对现行价格进行适当调整。②在国民经济对该产品已有需求的基础上,按满足新增的需求量所需的边际费用确定。(见水电站经济分析)

(2)财务分析。从业主角度进行水电工程项目的评价。以投资偿还年限最短作为评价的准则。按国家现行的价格、税收制度和利率,对建设项目的费用、效益、投资偿还能力等进行计算。(见水电站财务分析)

在水电站经济评价中,须寻求经济分析和财务分析都是最优的方案。当两者有矛盾时,一般应以经济分析为主,并分析矛盾的原因,调整某些经济政策,使财务分析上可行;当各方案经济分析差别不大时,也可以以财务分析为主,选择经济上次优的方案。

水电站经济评价的对象和内容 分规划评价、项目评价及水电站特征值选择、运行方案优化三类。

(1)规划评价。以经济分析的准则和方法,从能源开发和水资源综合利用的总体上,研究水电开发方案。规划评价常常与地区能源规划、电力系统电源规划、水资源规划结合进行。

(2)项目评价及水电站特征值选择。对具体水电工程项目进行经济和财务分析,评价项目的经济可行性和财务可行性及水电站特征值(如正常蓄水位、装机容量、机组机型等)的选择的经济评价。内容包括水电站投资及水电站年运行费的计算、综合利用工程费用分摊、水电站经济效益的计算和分析、对比方案的选定、方案评价及敏感性分析等。

(3)运行方案优化。优选水电站水库(群)运行调度方案。

水电站经济评价特点 由于水力发电开发和运行的特性,水电站的经济评价在计算范围、计算期、水电站群分析、联网效益和费用分摊等方面有一系列特点。

(1)计算范围大。水力发电兼有一次能源开发和二次能源转换双重性质,经济评价的计算范围应包括一次能源和二次能源系统。水电站除发电外,还有防洪、航运、灌溉、供水、养殖、旅游等效益,涉及国民经济的许多部门;库区淹没和移民涉及面也很广;水库对生态环境会产生有利和不利的影

响等。水电站的经济评价应包括以上的有关内容。

(2)计算期长。水电站建设及服务期较长。建设期,中型电站要4~5年,大型电站一般要10年或更长。服务周期,机组设备为20~30年,水工建筑物可达100年。因此,经济评价的计算期也应较长,一般按50年计。

(3)水电站群整体分析。对水电站进行梯级和跨流域径流及电力补偿径流调节,可增加系统水电站群总

保证出力和总发电量,在经济评价中不仅对水电站本身还应对水电站群整体进行分析。

(4)联网效益。大型水电站投入运行,可能引起大电力系统联网,往往具有“错峰”和减少系统备用容量的效益,在进行经济评价时也应计入这种效益。

(5)费用分摊。对具有综合利用效益的水电工程,应在费用分摊的基础上进行经济评价,或在评价时计入这种效益及相应费用。

(曹学敏)

shuidianzhan nian yunxing fei

水电站年运行费 (annual operational costs of hydropower station) 见水电站生产成本。

shuidianzhan paishui xitong

水电站排水系统 (drainage system of hydropower station) 为排出水电站厂房内各种弃水和积水,由水泵、管件、阀门等组成的排水管网。分检修排水和渗漏排水两个独立的系统。

检修排水系统 水轮机检修时排出尾水管、转轮室、蜗壳、压力管道等处尾水位以下部位的积水和来自快速闸门、进口阀、尾水闸门等的漏水,采用离心水泵由手动控制排水,如图1。

图1 检修排水系统示意图

对于具有高程低于尾水管底部的渗水廊道的水电站,设计时可利用其庞大容积作为集水池并经常处于排空状态,机组检修时用大管径排水管将尾水管内积水短时排入集水池,可缩短排水和检修周期,水泵可按水池水位自动控制运行。中国上犹江水电站等采用这种方式,效果较好。

渗漏排水系统 机组运行中的各种弃水、漏水和地下水汇集到集水井采用深井泵、卧式离心泵或射流泵按积水水位自动控制排水，如图2。

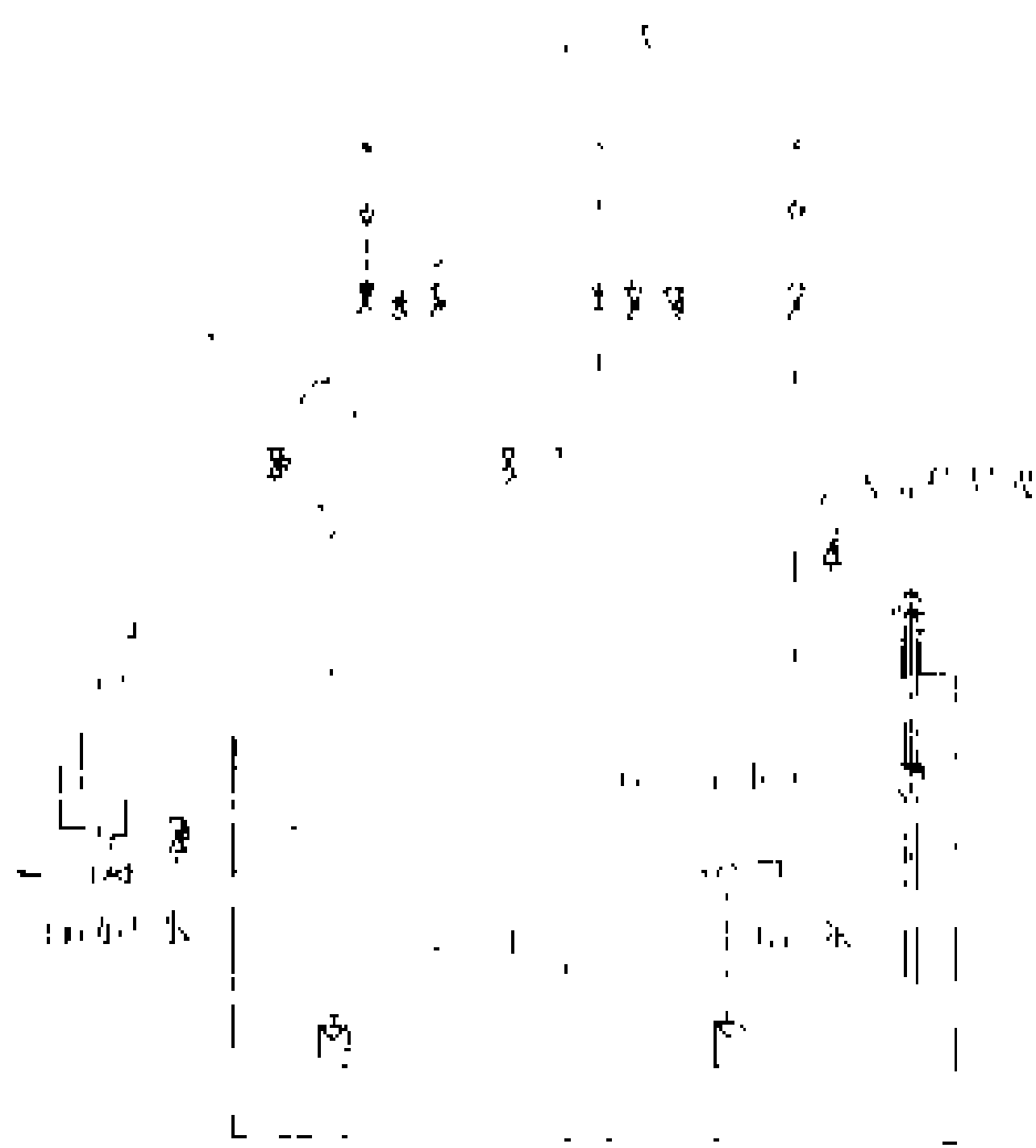


图2 渗漏排水系统示意图

在中小型水电站中也有将检修和渗漏排水两项合为一个排水系统，但必须有防止尾水管水流倒灌进厂房内的设施。

多泥沙河流水电站所有集水井都存在泥沙淤积难于清除，如在集水井内装设射流泵或泥浆泵可有效排除淤泥，效果较好。

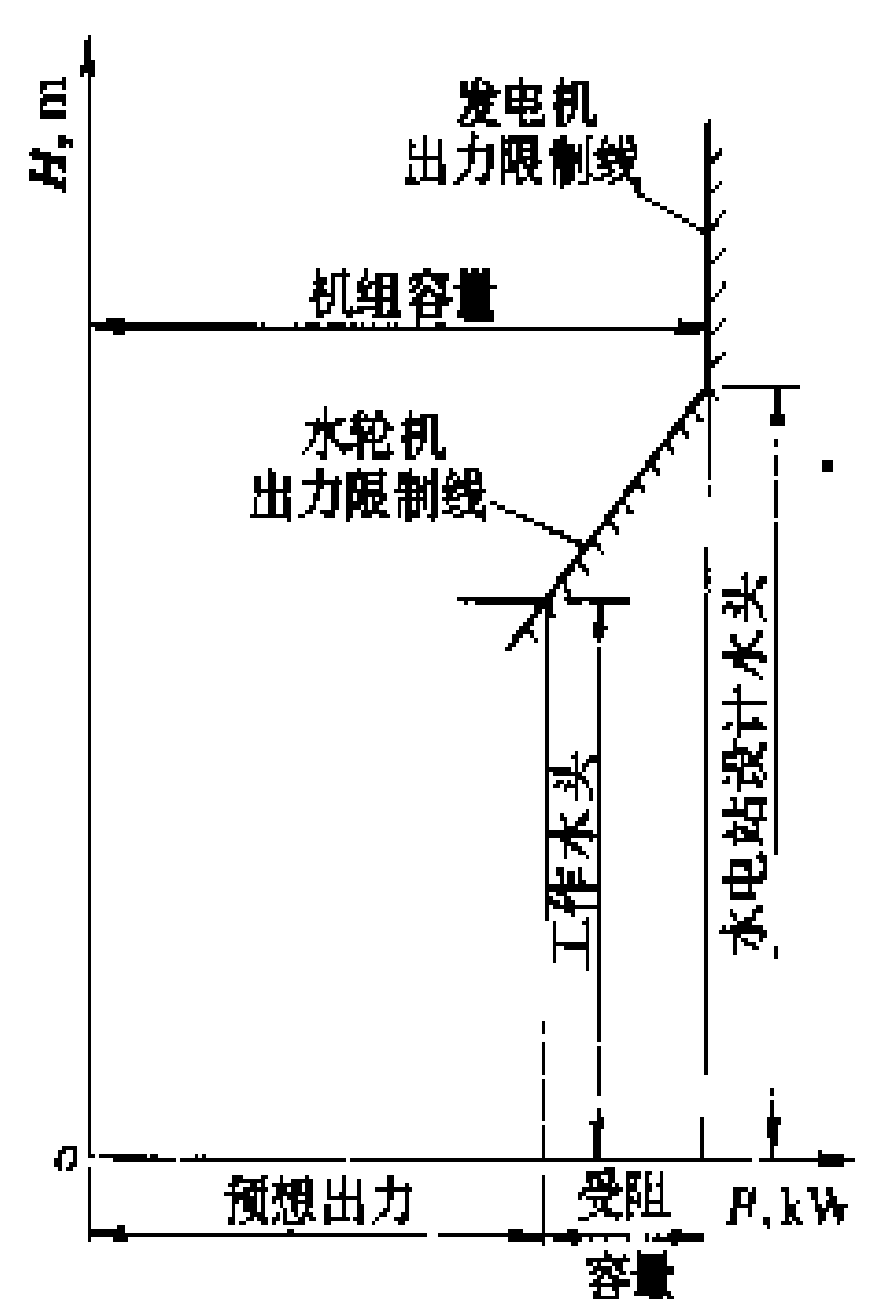
（青长庚）

shuidianzhan sheji shuǐtóu

水电站设计水头 (design head of hydro-power station) 机组额定容量相应的最小水头。

也称临界水头、计算水头。它是水电站重要的特征水头。水轮机的过水能力与水头平方根成正比，水头愈大，水轮机最大可能的轴出力也愈大，叫做水轮机水头预想出力，或简称为预想出力。但水轮发电机组的出力，还受发电机容量的限制，因此水轮发电机组的

水头预想出力，应为水轮机水头预想出力与发电机容量两者之较小者。当水电站工作水头小于机组额定水头时，机组水头预想出力小于机组额定容



水电站设计水头、预想出力及受阻容量示意图

量，其不足部分叫受阻容量。

水电站设计水头的选择是一个技术经济问题。若设计水头较大，当水电站水库消落深度（即正常蓄水位与死水位的高程差）较大时（如梯级上游担负主要调节任务的水电站），或低水头电站汛期出现大流量，下游水位大幅度抬高时，都将使水头大幅度减小，造成较大的受阻容量，这就须增加其他电站的容量，从而付出经济代价。若设计水头减小，则在水轮发电机组额定容量不变时，需加大水轮机直径和相应降低机组转速，从而增加水电站的建设费用。

水电站设计水头一般略低于电能加权平均水头，有时为了多利用季节性电能，也可考虑在水轮机直径和转速不变的情况下，适当提高水电站设计水头，以加大发电机容量。

水电站设计水头、预想出力及受阻容量示意图见图。

（伍宏中）

shuidianzhan shengchan chengben

水电站生产成本 (production cost of hydro-power station) 水电站生产电能的综合费用。

水电站生产成本有年生产成本和单位电量成本，而且又有发电成本、供电成本及售电成本之分。

计算方法 计算方法有两种类型。在世界上多数国家，成本中包含三部分，即运行费、折旧提成和按一定利率计算的资金时间价值。在中国，水电站生产成本只包含前两部分，不包含资金时间价值。有时，把包含时间价值的成本称为含利成本。生产成本一般按年计算，称为年生产成本。当按单位电量计算，称为单位电量成本，是年生产成本与年电量的比值。生产成本又可分为发电成本、供电成本及售电成本。水电站年发电成本包括水电站的运行费、折旧提成和按一定利率计算的资金时间价值。单位发电成本是年发电成本与年发电量的比值。年供电成本与年发电成本相同。单位供电成本是年供电成本与年供电量的比值，年供电量为年发电量扣除电站自身厂用电量。年售电成本是在年发电成本上，加上从电站到用户的输电、变电、配电过程的年运行费和年折旧费提成的总和。单位售电成本是年售电成本与年售电量的比值，年售电量等于年供电量减去输、变、配电过程中损耗的电量。

水电站年运行费 它是为维护、管理及运行而支出的费用，又名年经营成本。其中包括大修理费、工资、材料费、水费、水库区维护基金及其他费用。对抽水蓄能电站还包括抽水耗电的电费。水库区维护基金是每年按电量提取的部分资金，用于库区维护和解决库区移民过程中的遗留问题。

年折旧提成是为了弥补生产过程中建筑物、设备等损耗从售电收入中提取的资金。分别按建筑物、设备等自身的折旧率提取。折旧率是其使用期或经济寿命期的倒数。

由于水电站不消耗燃料,且运行管理人员少,建筑物和设备寿命长,折旧提成低,故水电站的发电成本和年运行费用,远低于火电厂。一般只有后者的 1/3 左右。

(曹学敏)

shuidianzhan shuiku youhua diaodu

水电站水库优化调度 (optimized operation for reservoir of hydropower station)

根据电力系统对水电站运行的要求,并顾及综合利用的各项目标,运用优化理论和方法所得到的相对优化的水电站水库长期运行策略。它是指导水电站水库实现最佳长期控制运用的一种科学管理方法,能较充分地反映面临时段的决策对未来时期运行的影响,因而比常规的水库调度方法优越。电力系统中水电站实现优化调度,一般均可在满足规定的综合利用要求下,获得增加电量、提高保证出力和提高供电可靠性等效益。

水电站水库优化调度可分为单库优化调度和库群联合优化调度两种。后者比前者要复杂得多,所使用的具体数学方法也不尽相同。优化准则一般都是在满足运行可靠性及综合利用各项要求等一组约束条件下,使水电站总效益的数学期望值达最大,或使电力系统年支出费用的数学期望值达最小。

单库优化调度 运用优化理论推求单个水电站水库优化运行策略,即确定水电站在年内各时段的优化运行方式。

调度模型分类 根据径流描述方法的不同可分为确定性模型和随机模型两类。①确定性模型结构简单,求解相对容易。其基本假定是未来时期各时段的入流确切已知。这一假定显然与实际情况不符,因此它所求得的结果并非真正的优化效益,所得的优化策略无法指导水库的实际运行。为弥补这一缺陷,通常对该模型求解所得到的水库水位和水电站出力的过程线,用统计方法建立各时段状态变量(如时段初库水位)与决策变量(如水电站时段平均出力或时段末库水位)的相关关系,作为指导水电站水库的调度线。这类由确定性模型派生出来的模型称为隐随机模型,由此得到的实际效益比理想的优化效益低。②随机模型结构复杂,它认为未来时期各时段的入流服从一定的概率分布,且这种分布可根据已有的入流实测系列用统计方法预先确定。因此,所得到的优化运行策略能够直接指导水电站水库的实际运行。由于考虑到未来时期入流的各种“实

现”的可能性,其优化效益要用期望值表达,即具有“平均的意义”。实际运行中可通过预报手段,提高未来时期径流的预报精度,把不确定因素局限在预报误差的最小范围内,则水电站水库调度可能得到更切近实际的优化结果。

按优化目标的选定,优化调度模型可分为单目标优化和多目标优化两种。前者选定一个主要目标作为优化目标,把综合利用的其他目标或要求作为约束条件予以考虑。后者要求几个目标同时达到总体优化,但它只适用于确定性模型。通常,水电站水库优化调度只考虑单目标优化。

单一发电水库优化调度 这是目前研究最多的课题。其优化准则常取调节周期(年)内发电量最多。对确定性模型,早期应用的数学方法有等微增率法、变分法、多元函数求极值法等,近年来多采用线性规划法、梯度法、动态规划法(包括增量动态规划)和动态解析法等。随机模型一般多采用马尔科夫决策规划(或称随机动态规划)。

优化实例 中国柘溪水电站,水库库容 35.7 亿 m^3 ,装机 447.5 MW。采用马尔科夫决策规划法建立模型,逆时序逐段调节计算,把一步多维问题化为多步一维问题求解,并用“偏离最优损失”判别式检查方案的优劣,引入“效益惩罚”方式来满足供电保证率可靠性要求。实现优化调度,可增加年发电量 3% 左右。

建模过程中以年为调节周期,按旬分为 36 个时段;每时段初、末库水位分别划分成 20 级和 96 级;入库径流分为 15 种状态;发电出力从设计保证出力到装机容量分为 16 段。这样,全年 36 个旬可参加比较的决策计有 1036800 个,从中优选出 10800 个最优决策,其结果为决策变量,以面临旬平均出力或旬末库水位表示。通过计算机打印出 36 张图表,分别代表年内 36 个时段。每张图表均表示面临时段水库状态(时段水库水位及时段入流量)与决策变量(时段平均出力或时段末库水位)的关系。根据此图指导水电站水库调度。

库群联合优化调度 运用优化理论编制水电站水库群的优化运行策略,即确定水电站群在年内各时段的优化运行方式。大多数电力系统中都有许多座水电站参加运行,联合优化调度就是要统一考虑这许多水电站水库彼此间的水力联系和电力联系,进行水文、库容和电力补偿,以充分发挥库群的总体效益。

水电站群按水力联系情况,分为无水力联系水电站群(并联式水电站)、有水力联系的梯级水电站群(串联式水电站)以及这两者混合的水电站群(混合式水电站)。梯级水电站群的特点是各梯级水电站间的水头、流量有密切联系,而并联式水电站则无此特点。一般而言,水电站群中包括有多种调节性能的水电站,既

包括有水库调节的短期调节水电站和长期调节水电站,又包括无调节的径流式水电站。

单一水电站的发电能力,受天然径流丰枯影响极大,即使有长期调节水库,其丰枯水期电力电量的差别仍十分悬殊。水电站水库群联合调度可以弥补这个不足,就是利用水电站和水库群之间水文不同步和水库调节性能的差别,取长补短,进行全系统水电站间相互补偿,以增加水电站群的供电能力。所以,水电站水库群联合优化调度远比单一水电站水库优化调度复杂。其复杂性表现为:①水电站库群联合优化调度中,各库的决策变量,不但与本库的状态变量有关,而且与参与联合调度的其他水库的状态变量有关;②为保证每个电站的工作容量得到充分利用,必须进行电力系统日负荷图上的电力电量平衡;③如果采用随机性模型,则库群入流的水文统计描述比较复杂,考虑多站径流的自相关和互相关的联合概率分布还缺乏成熟的方法,为此常要引入一些不尽合理的假定。

迄今为止,利用马尔科夫决策规划严格求解库群联合优化调度在规模上不超过两个水库。对于多于两库的情况,则必须简化,以减维至不超过两库的规模。比如,或预先固定某些水库的决策变量与待求解库的决策变量之间的函数依赖关系后,再对待求解库进行求解;或用聚合方法依顺序将水库群聚合为两库,一个为聚合库,一个为待求解库,在求出后者的运行策略后再将聚合顺序及待求解库改变,直至每个水库均轮换为待求解库且其运行策略均稳定不变为止;或用聚合分解方法先将水库群聚合为单库,在求出聚合单库的优化策略后,再逐时段将聚合单库的决策分解为各库的运行决策;等等。对于最简单的并联库群情况,则可分别作出各个单库的优化策略(调度图)及面临时段决策对未来时期进行效益的相对影响(递推线)后,再根据电力系统对水电站群的发电要求,按“偏离损失最小”原则确定各个水电站水库的时段运行决策。

中国有的单位建立了水电站水库群“有效蓄能”概念,在满足电力系统对水电站群总体要求下,采用维持时段末库群有效蓄能最大的原则,逐时段确定各水电站的优化运行决策。这种方法直接求解多达一百多个水电站水库联合调度规模。经实测长系列计算检验,其结果达到了近似优化的效果。

(黄益芬 伍宏中)

shuidianzhan tongxin

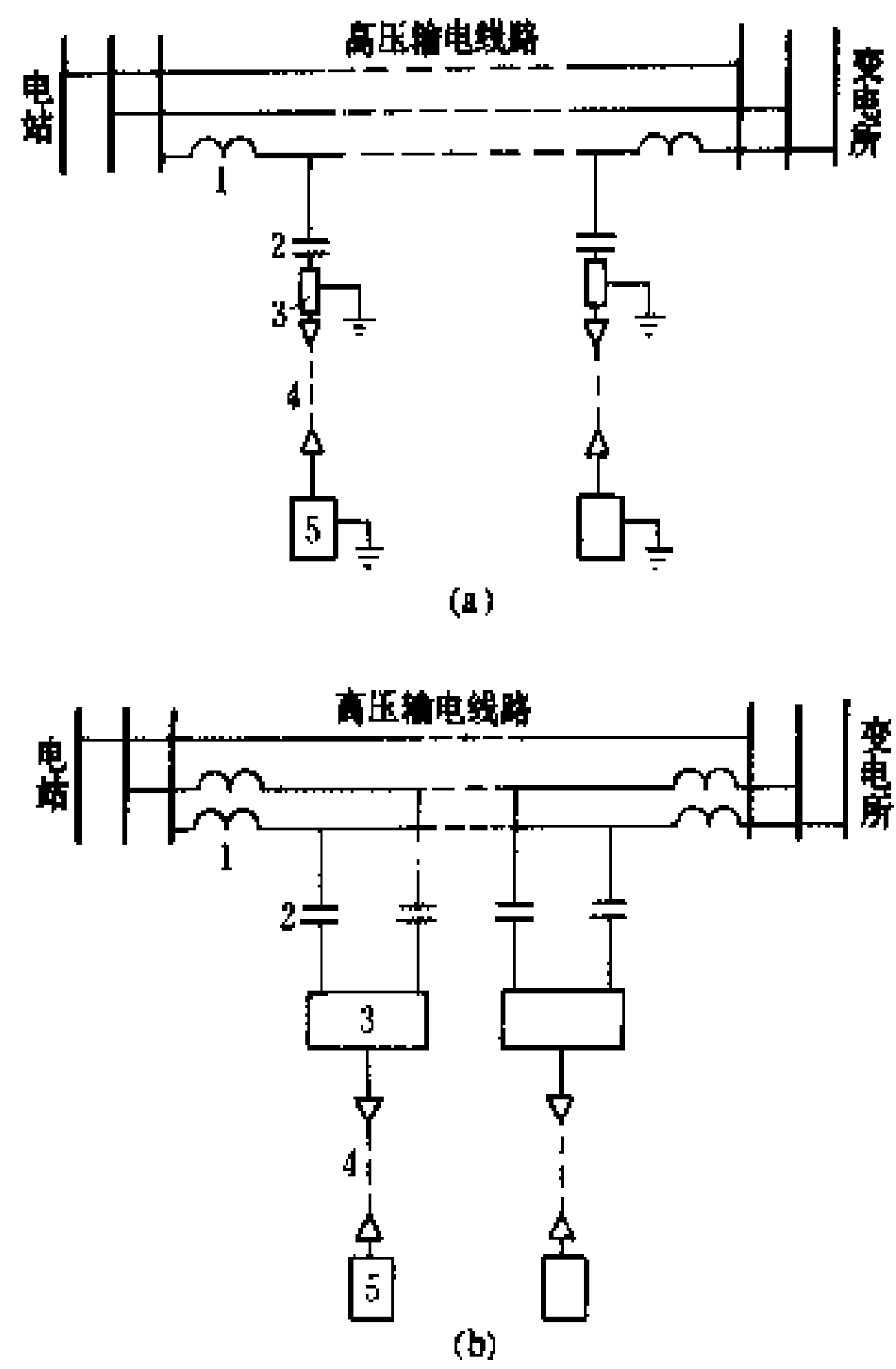
水电站通信 (communication of hydropower station) 利用信道传递水电站运行、管理信息的技术。旨在建立从信号的产生、变换、处理、传输、交换和接收等全过程的通信系统,主要传递电力调度、

继电保护,远动、计算机、水情测报等系统的信息。迅速、准确、稳定地传递上述各种信息,是电力系统安全、经济运行和提供优质电能的重要手段。它是实现电站及电网调度自动化和管理现代化的基础。

水电站通信主要分电力系统调度通信、厂内通信以及梯级水电站通信。

电力系统调度通信 它是水电站与电力调度主管部门之间的通信。一般采用的有电力线载波、微波接力、卫星或光纤等通信方式。

电力线载波通信 它是利用高压输电线路来传输高频信号的一种通信方式。由电力线载波机、结合设备、高频阻波器等部分组成。常用的有相-地和相-相两种耦合方式,见电力线载波通道接线示意图(a)和图(b)。



电力线载波通道接线示意图

(a) 相-地耦合; (b) 相-相耦合

- 1 高频阻波器; 2—耦合电容器; 3—结合滤波器;
4 高频电缆; 5—电力线载波机

(1)电力线载波机。由于电力线载波通信是以高压输电线路即电力线作为传输通道,所以和一般载波机有区别:①由于电力线路存在严重的工频谐波干扰,故采用较高工作频率,一般选在40~500 kHz范围内。②电力线杂音电平较高,一般在-43~-21 dB左右,需选用较高的发射功率,以保证通话的清晰度。③为提高设备利用率,故采用“复合使用”方式,同时传递电话、远动、高频保护、传真等信息。

(2)结合设备。包括耦合电容器、结合滤波器和高

频电缆,其作用是沟通电力线和电力载波机之间的高频通路,并将电力线上工频高电压和大电流与通信设备隔开,以保证人身和设备的安全。①耦合电容器是将高频信号引入载波机的耦合元件。除了采用一般耦合电容器外,也可利用电容式电压互感器作为高频耦合电容器。②结合滤波器与耦合电容器串联后组成一个高通或带通滤波器,它可以有效地传输高频信号,抑制通带外的干扰,并使电力线和高频电缆的阻抗相匹配(一般高频电缆阻抗为 $75\sim 100\ \Omega$,电力线阻抗为 $200\sim 400\ \Omega$)。③高频电缆是结合滤波器与载波机间的连接线。

(3) 高频阻波器。它由强流线圈和调谐元件,保护元件等部分组成,装在开设载波通道的输电线路,串接在开关站的线路侧或支线的分支点上,因为它对工频电流阻抗较小,对高频电流呈现较大阻抗,容易通过电力电流,并阻止高频信号电流进入开关站或分支线,减小通道损耗。

微波接力通信 利用波长为 $1\text{ m}\sim 1\text{ mm}$ (相应频率为 $300\text{ MHz}\sim 300\text{ GHz}$)的微波波段的无线电波传递信息的一种无线通信方式。微波在自由空间像光波一样沿视线传播,它不被大气层和电离层反射,但由于地球曲率的限制,若在地面进行微波通信就必须把天线架设到一定的高度,使发射天线与接收天线的波束中心连线不受地面的阻挡,天线能够“互视”,互视的距离受天线实际架高的限制,为使通信距离超越“互视”距离,在适当的“互视”距离上设立中继站。同时无线电波在空间传播过程中,能量要受到损耗,频率越高距离越远,衰减越大。因此实现两地间远距离微波通信,中间必须设置微波中继站。微波中继站把接收到的信号放大,再转发到下一个中继站。一般每隔 50 km 左右必须建立一个微波中继站,其数目依通信距离而定。用这种方式可把微波信号最终传输到几百至几千公里以远的目的地。微波通信具有通信频带宽、传输容量大(一条微波电路可开通话路由几十到几千路)和传输质量高的显著特点,因此不少国家把微波接力通信作为主要通信手段。微波接力通信系统由一系列微波站组成,各站按照功能不同通常划分为终端站、中继站、主站、枢纽站等几种站型,每站设置的基本单元有天线塔、天线、馈线、发射机、接收机、监控设备和供电设备等。终端站所传信号在基带上可与模拟频分多路终端设备或与数字时分多路终端设备相连接,前者称为模拟微波接力通信系统,后者称为数字微波接力通信系统。由于数字微波接力通信系统具有便于加密和传输质量好等优点,因此日益得到推广应用。

卫星通信 利用人造地球卫星作为中继站转发无线电信号(使用频率较多的是 4 GHz 和 6 GHz),在两

个或多个地球站之间进行的通信。现代实用通信卫星主要使用地球静止卫星,它的理论轨道是与地球自转同步的轨道,卫星定于赤道上空 35786 km 高处,卫星运行周期为一个恒星日即 $23\text{ h}56\text{ min }0.4\text{ s}$,从地面看去,恰似停在空中静止不动。三颗地球静止卫星组成系统,就可实现全球大部分地区的通信。与地面通信相比,卫星通信具有更好的广播性,可以在卫星天线波束覆盖的大面积范围内,根据需要建立通信网,不受地形地貌的限制,具有多地址功能。卫星通信是一种传输质量好、接续灵活和价廉的通信方式。它能在大面积范围内提供电话、电报、电视、数据、传真等通信服务,既适于固定通信,又适于移动通信,既是国际通信的主要手段,又可以成为国内通信的主要手段。卫星通信主要由空中的通信卫星和地面的地球站以及与此二者联系的测控跟踪系统等组成。

(1) 通信卫星。由下列各分系统组成:①转发器分系统及其附属天线分系统,接收来自地球站的电波,将其放大、变频后再向地球站发射。②遥测指令分系统,测量卫星内部各种设备的性能。③控制分系统,控制卫星姿态和轨道参数等。④电源分系统(包括太阳能电池),供给以上各种设备所需的电能。

(2) 地球站。由下列各分系统组成:①天线馈源和跟踪系统,保证地球站天线始终指向处于慢漂状态的卫星。②发射系统,把已调制信号放大到一定电平,以保证地球站具有一定的全向有效辐射功率。③接收系统,保证接收信号达到一定的信噪比并放大到解调需要的电平。④调制解调和多址联接系统,把传输的基带信号变为与接收机和发射机接口的中频信号,并保证各地球站按一定的多址联接方式通过卫星建立通信网。此外还配备有终端接口设备、监测控制台、电源系统等。

光纤通信 通过光导纤维传输信息的通信方式。主要由光发送机,光接收机及光纤(光缆)、连接器、耦合器等组成。光发送机包括光发信电路、激励电路和光源。光接收机包括光检测器、均衡放大器和收信电路等。发信端将所需传输的信号加到发送机的输入端,经处理的电信号控制发送机中的光源,将电信号转换成光信号,从而实现信号的电-光转换。光信号经连接器耦合至光纤,并由光纤传输至接收端,在接收端光信号经光检测器转换成电信号,从而实现信号的光-电转换。再将电信号放大、处理,并通过解调电路恢复成原来的电信号。光纤通信是现代信息传输的重要方式之一,具有频带宽、通信容量大、损耗低、重量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、不怕雷击、保密性好、误码率低等优点而得到迅速发展。

厂内通信 包括厂内生产调度通信及行政管理通

信。厂内生产调度通信是水电站安全运行指挥生产的必需工具。行政管理通信用于电站内部各行政管理部门之间以及电站与所在地区各有关单位之间的相互通信联系。厂内通信采用的交换机有人工电话交换机、步进制自动电话交换机、纵横制自动电话交换机以及程控交换机。

(1) 人工电话交换机。在电话通信的过程中,靠人工接收呼叫、控制接线、拆线等有关操作,完成通信交换。人工电话交换机按电源供给方式可分为磁石制和共电制两种。其特点是设备简单,制造容易,成本低,但接线速度慢,效率低,不能适用现代电站通信的要求。

(2) 步进制自动电话交换机。机键受用户拨号直接控制,主要由预选器、选组器和终接器三种机键组成。电路比较简单,但由于采用滑动接触,触点磨损大,杂音大,工作速度慢,维护工作量也大。

(3) 纵横制自动电话交换机。主要由纵横接线器(接续元件)和继电器(控制元件)组成。采用间接控制方式,用户拨号先由记发器记存,再通过标志器进行接续。比步进制选择器触点磨损小,接触可靠,杂音小,其主要缺点是耗费贵重金属较多,制造成本高。

(4) 程控交换机。用电子计算机进行程序控制的交换机。通过软件和硬件相互配合完成对交换的控制。硬件包括交换网络、控制设备、接口设备和输入输出设备。软件是由各个程序构成的,这些程序根据电话交换的内部和外部要求来控制硬件,它在不改变原有硬件的前提下,就能改变或增强系统性能,如缩位拨号、转移呼叫、热线服务等。此外,还具有体积小、接续速度快、杂音小和维护管理方便等优点。它不仅能为用户提供良好的话音服务,而且可以提供多种非话音服务,便于向综合业务数字网(ISDN)方向发展。

梯级水电站通信 根据梯级水电站调度管理及各种信息传输的需要,设有以梯级调度所为中心的调度管理通信设施,设置调度总机和行政管理交换机,其通信方式视具体情况采用载波通信、微波通信等。

发展简史和趋势 19世纪末许多国家已基本建立起人工交换的有线电话网。之后,建起了以微波接力通信为主体的通信网,机电制自动电话交换系统也已实用。20世纪50年代开始建设长途自动拨号电话网,60年代开始使用卫星通信。70年代光纤通信飞速发展,它是一种容量大,有广阔前景的通信方式。80年代初以数字传输和数字交换为核心的电话综合数字网逐渐发展起来,在数字网的基础上又发展起综合业务数字网,它把话音、数据和图像等各种业务综合进行数字传输、交换和处理。

中国水电站的通信是随着电网规模的扩大和通信

技术的发展而发展起来的,20世纪70年代以前主要是依靠电力线载波通信,另外还有一些明线载波以及音频电缆和特高频通信,交换机一般都是步进制,纵横制等机电式设备。80年代以来开始采用了数字微波、卫星通信、光纤通信和程控交换机等新技术设备,使通信的面貌发生了根本的变化,通信方式的多样化提高了水电站通信的可靠性,今后的发展方向是综合数字网,并将实现综合业务数字网。

(皮淑范)

shuidianzhan touzi

水电站投资 (investment in hydropower station)

水电站固定资产的建设费用。水电站造价是水电站投资扣除回收费用后的建设费用。回收费用主要是施工机械设备的回收费用。

投资费用分类 在中国,一般把水电站投资分为建筑工程费、机电设备费、金属结构和启闭机械设备费、临时工程费、水库淹没补偿费和其他费用六个部分。

(1) 建筑工程费。含坝、泄水建筑物、引水系统、水电站厂房、升压变电站建筑工程和过坝设施等建筑物的材料和施工费。

(2) 机电设备费。含水轮机及附属设备,水轮发电机及附属设备,厂用电、通信、照明、采暖通风等设备,升压变电站设备和起重设备等的购置和安装费。

(3) 金属结构和启闭机械设备费。含各类工程的钢闸门、启闭机、拦污栅等设备材料费和安装费。

(4) 临时工程费。含施工导流、工地内外交通、施工临时房屋、施工期供电、施工期河道临时通航等建筑物和设施的建设费以及部分设施的拆除费。

(5) 水库淹没补偿费。

(6) 其他费用。如建设管理费、生产准备费、科研和勘测设计费、环境保护费、施工机械转移费等。

在西方国家,一般按工程整体所需材料、设备、人力等分类计算并编制概(预)算。

在中国,设计单位根据设计的工程量,按主管部门颁发的规程和定额,在可行性研究阶段编制水电站投资估算;在初步设计阶段编制投资概算。考虑施工过程中可能出现的意外变化及因此而增加的工程量,投资估算和概算中增列基本预备费,在初步设计阶段,约为上述前五部分总和的10%左右。考虑到施工期价格变化因素,在投资资金筹措方案中还要考虑价差预备费(数额据预测的价格增长率估列)和施工期利息。

项目竣工后,根据项目的决算,把投资和施工期利息的一部分计为项目的固定资产。但上述第(6)部分费用中的生产职工培训费、办公及生活用具购置费、备



用配件购置费和施工机械转移费等不计入固定资产。据统计水电站的固定资产形成率,即计入固定资产部分的比例,一般为95%左右。

水电站投资是水电站经济评价的基本依据。在经济分析时,各项费用用影子价格计算。在财务分析时,用现行价格计算。

投资(造价)单位指标 ①水电站总投资(造价)除以其装机容量,叫做单位容量投资(造价),以元/kW表示。②水电站总投资(造价)除以其多年平均年发电量的商,叫做单位电量投资(造价),以元/(kW·h)表示。③在坝高不变的情况下,水电站增加装机容量的单位投资(造价),只含引水建筑物、厂房、机电及升压站等部分,叫做补充容量投资(造价),以元/kW表示。④水电站增加多年平均年发电量的单位投资(造价),叫做补充电量投资(造价),以元/(kW·h)表示。

水电站投资(造价)的特点是单位容量的投资(造价)比火电厂大,约为后者的1.5~2.0倍,而补充容量的投资(造价)却比火电厂小,约为后者的1/2~1/3。

(曹学敏)

shuidianzhan xiaoyi

水电站效益 (economic benefit of hydropower station) 水电站为国民经济提供物质产品和服务的价值。水电站效益是水电站经济评价的重要计算内容。物质产品为电力和电量。服务主要是除害兴利等经济效益和社会效益。从业主角度计算可获得的财务收入,称为财务效益,根据业主的经营范围确定效益计算范围。财务效益根据现行价格和税收制度计算,用于水电站财务分析。当从国家经济整体角度计算水电站的效益,称为经济效益。经济效益的计算比较复杂,它有不同于一般工业项目的特点,并且包括直接效益和间接效益两个部分。

水电站经济效益计算的特点 水电站经济效益计算有如下特点。

(1) 电是不能大量储存的产品,电力系统必须同时完成发电、输电、配电和消费各项任务。水电站是电力系统的一个组成部分,其运行方式受用电负荷、其他电站和输变电设备等能力的约束。而它的水能资源又有随机性,与电力系统电力、电量需求无关。因此,水电站所能利用的天然水能资源有一部分不能转化成为有效的电力、电量。所以要从电力系统整体来分析计算水电站可实现的效益。对兼有防洪、供水、航运等综合利用的水电站,则要根据包含电力和其他有关行业的系统进行分析计算。

(2) 在服务期内,水资源系统和电力系统的条件可能有变化,如用电负荷的增长、在水电站上下游修建新水电站、综合利用任务的增减以及电力系统电源构成的变化等将导致水电站效益的变化,因此要计算服务期内水电站的总效益。

(3) 水能资源是有一定分布规律的随机量,其满足系统负荷要求的程度是随机的,所以水电站效益要用数理统计方法计算。供电效益有两种计算方法:一种是以某供电可靠度为条件,据此计算水电站可提供的电力、电量效益的数学期望值。另一种是选择某保证率的来水情况计算水电站的电力效益,并以多年平均年电量为电量效益,据此计算水电站的年效益。中国一般采用后一种方法,选择的保证率在80%~95%之间。(见保证出力)

水电站效益一般包括产品和服务的全部价值。其中,扣除了项目的运行费和折旧提成后的剩余部分称为净效益。

直接效益 直接效益的计算主要用于水电站经济分析。直接效益包括内部效益和外部效益两部分。

(1) 水电站项目内部效益是由本项目提供产品的价值。包括:①本项目提供的电力、电量。②本项目水库蓄纳洪水,减免水灾损失。③增大供水量、扩大供水范围、提高供水保证程度,从而增大工农业产值或降低供水费用。④增大河道通航能力、延长通航期、降低航运费用。⑤库区发展渔业、旅游等。

(2) 水电站项目外部效益是指本项目为其他部门的直接作用反映在外部的效益。包括:①使本项目下游水电站增加电量并部分提高供电质量,如增加保证出力和发电量等。②改善全电力系统水电站汛期与枯水期电量的分配比例,提高系统供电质量。③提高电力系统调峰能力,改善系统内火电厂的运行条件,从而节约火电厂燃料、减少运行费用、降低事故率、延长机组使用寿命等。

间接效益 也称社会效益,或二次效益。一般难以用货币量计算。水电站在建设期投入大量资金和技术力量,吸收大量劳力,建成后向本地区供应电力,改善水资源利用条件,增强运输能力,从而促进地区经济发展等均属间接效益。

(曹学敏)

shuidianzhan yasuo kongqi xitong

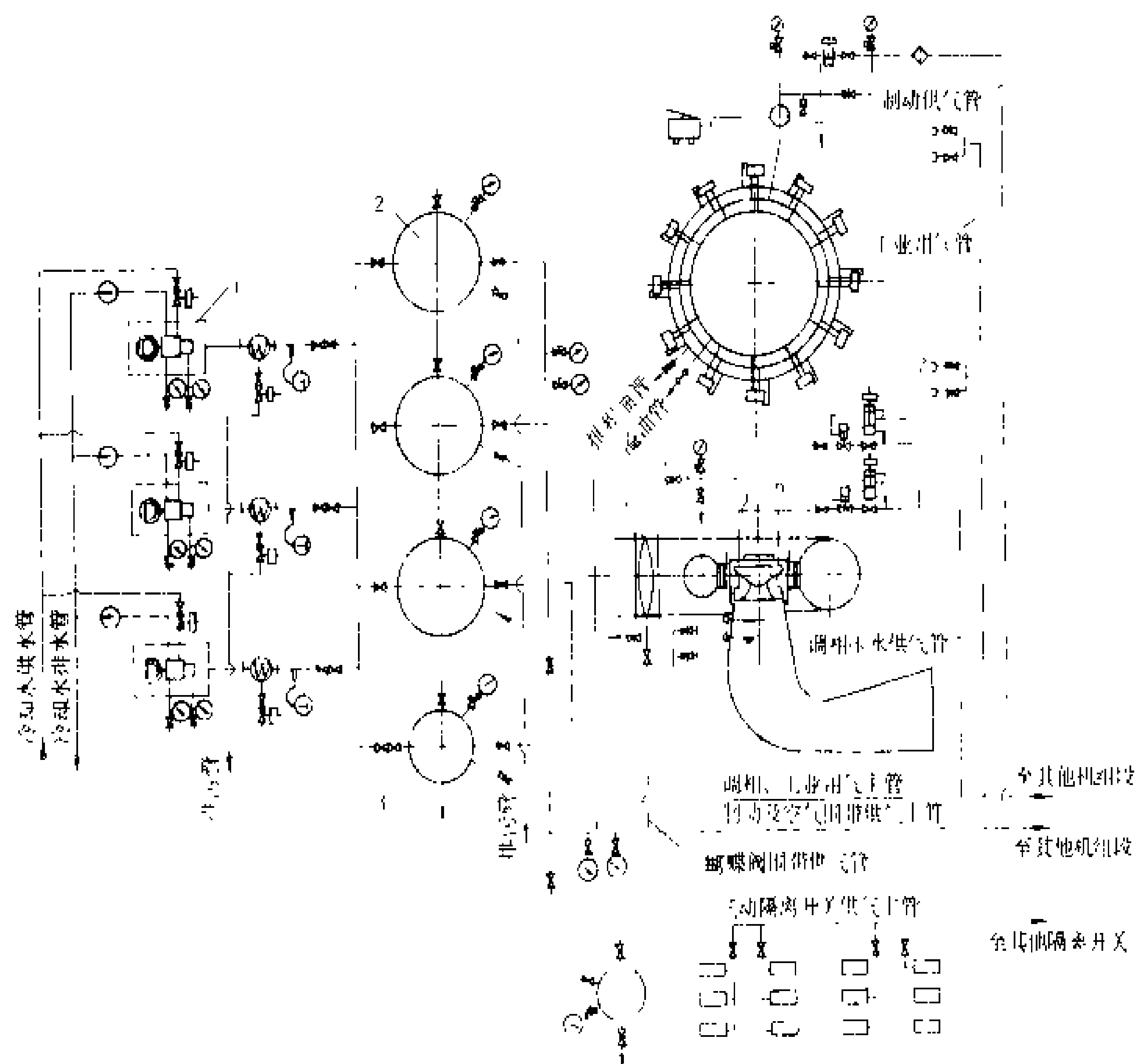
水电站压缩空气系统 (compressed air system of hydropower station)

为水电站机电设备提供运行所需压缩空气而建立的包括有空气压缩机、贮气罐和管件、阀门等组成的供气管网。水电站机电设备需用压缩空气的项目有:①空气断路器;②隔



离开关的操动机构；③水轮机调速器油压装置；④进口阀围带；⑤发电机制动闸；⑥水轮机轴承检修密封；⑦调相压水或可逆式水泵水轮机压水起动；⑧水电站进水口清扫及防冻破冰；⑨检修作业以及减轻尾水管压力脉动补气等。

低压压缩空气系统示意如图，该系统的压力一般为 0.7~0.8 MPa，基本能满足上述②、④、⑤、⑥、⑦、⑧、⑨等项用户的需要，其中项④只能用在电站水头不大于 50 m 的情况。对于可逆式水泵水轮机压水起动一般需用较高压力的压缩空气。



低压压缩空气系统示意图

1—空气压缩机；2—贮气罐；3—制动及围带供气专门贮气罐；4—进口阀围带；5—水轮机轴承检修密封供气管；6—调相压水供气管；7—检修作业；8—发电机制动闸

空气断路器和油压装置对压缩空气压力的要求分别为 2~4 MPa 和 2.5~7 MPa，空气要求清洁、干燥，高压压缩空气系统除装设高压空气压缩机外，管路中还要增加空气干燥器等设备，最常用和较为方便的方法是将空气加压到 2~3 倍工作压力后再降到工作压力使用的降压干燥法和装设空气干燥器。水头高于 50 m 的进口阀围带密封止水用气，通常从高压压缩空气管路引出经减压阀减压到大于阀门工作水头 20~30 m 时使用。

压缩空气系统运行的可靠性要求很高，一般都配

置必要的自动化控制元件，在允许的工作压力范围内自动控制运行。

(青长庚)

shuidianzhan you xitong

水电站油系统 (oil supply system of hydropower station)

为用油机电设备提供合格油的由油泵、油罐、油处理设备和管件阀门组成的管网。水电站有透平油和绝缘油两个系统，都是用来接受新油、贮存净油、向设备充油、添油、排油以及油的

净化处理等。中小型水电站因用油量少，油系统可简化；在梯级水电站，多在适当位置建中心油务管理机构，承担各梯级电站的油务管理以及油的再生等工作。配合油系统的设置，水电站还根据需要建立油化验室和相应的全分析或简易分析设备。

透平油系统为水轮发电机组的各轴承提供润滑油，为水轮机调速器、进口阀的油压装置提供操作用油，两项用油一般均统一采用运动粘度为 20~32mm²/s 的透平油，其系统由油处理室及滤油机、油库及油罐等

组成。

净油罐的容积应满足一台最大用油机组需油量的 110%，油罐的数量应满足净油、污油的存放以及油的处理、更换等需要，压力滤油机和真空滤油机用于去除杂质和水分，以真空滤油机的脱水效果较好。

透平油库和油处理室多布置在厂房底层的专用房间内，人工操作，室内要视容量设水喷雾灭火和通风排烟设备。

绝缘油系统 主要供给变压器、油断路器等电气设备用油。功能、设备以及系统配置均与透平油系统类



似。绝缘油库多为露天布置,油处理室设在厂外专门房
间中,室内设水喷雾灭火和通风排烟设备。

(青长庚)

shuidianzhan yunxing fangshi

水电站运行方式 (operational mode of hydropower station) 包括带计划负荷运行方式、调频运行方式、备用运行方式和调相运行方式。

水电站带计划负荷运行方式 水电站担负电力系统计划负荷的方式,可分为日运行方式、周运行方式和年运行方式。

(1)系统日负荷特性及水电站的日运行方式。系统负荷在一天的 24h 中变化较大,其形状视系统用户组成及其用电特性(生产的连续性及生产班制)而异。通常有两到三个峰。两个峰的高峰负荷多出现在上午及晚上。三个峰的负荷,除午、晚峰外,下午还有一个峰。低谷多出现在凌晨及中午。电力系统一天中的负荷,除有峰谷的变化外,还有随机跳动。在电力电量平衡计算中,系统日负荷是先将锯齿形的跳动修匀后,根据需要,以 1h 或若干小时为单位,以柱状近似。一天中负荷的平均值与最大负荷的比值,称为日负荷率,常以 γ 表示。一天中的最小负荷与最大负荷的比值,称为日最小负荷率,常以 β 表示。 γ 及 β 值越大,表示日负荷变化越小,反之,表示日负荷变化越大。中国较大的电力系统, γ 值一般为 0.75~0.85, β 值一般为 0.65~0.70。电站在一天中担负某一固定的负荷,叫担基荷(基底负荷);电站在一天中担负系统负荷的变动部分,叫担峰荷,也叫调峰;若电站担负部分尖峰和部分基荷,则叫担腰荷。在同样保证出力的情况下,担峰荷的水电站,其装机容量较大,担基荷的水电站的装机容量较小,担腰荷的水电站的装机容量则介于两者之间。水电站适于担负尖峰负荷,其理由如下:①水电站增加装机容量的费用远低于火电厂,且水电站增加装机容量可得到额外发电量。②水电站机组起停灵活,增减负荷的速度快,且机组所担负负荷不受技术最小出力的限制。由于如下理由,火电厂(含核电站)适于担负基荷:①火电厂增加装机容量的费用较大。②火电厂机组起停不灵活,增减负荷速度较慢。③火电厂机组所担负的负荷受技术最小出力的限制。④火电厂担峰荷煤耗远较担基荷为大。抽水蓄能电站应在低谷负荷时抽水,在尖峰负荷时发电。日负荷图及水电站日运行方式见图 1。

(2)系统周负荷特性及水电站的周运行方式。系统在周内的例假日,负荷明显下降,而工作天则维持较高的负荷,但也有一定的波动,一般假日前后的负荷低于其他工作天的负荷。系统一周的平均负荷除以周内日平均负荷的最大值,所得的商,叫周不均衡系数,通常

以 σ 表示。参加系统中运行的水火电站均有其不同的周不均衡系数。水电站在假日宜少发电,将能量节省下来,

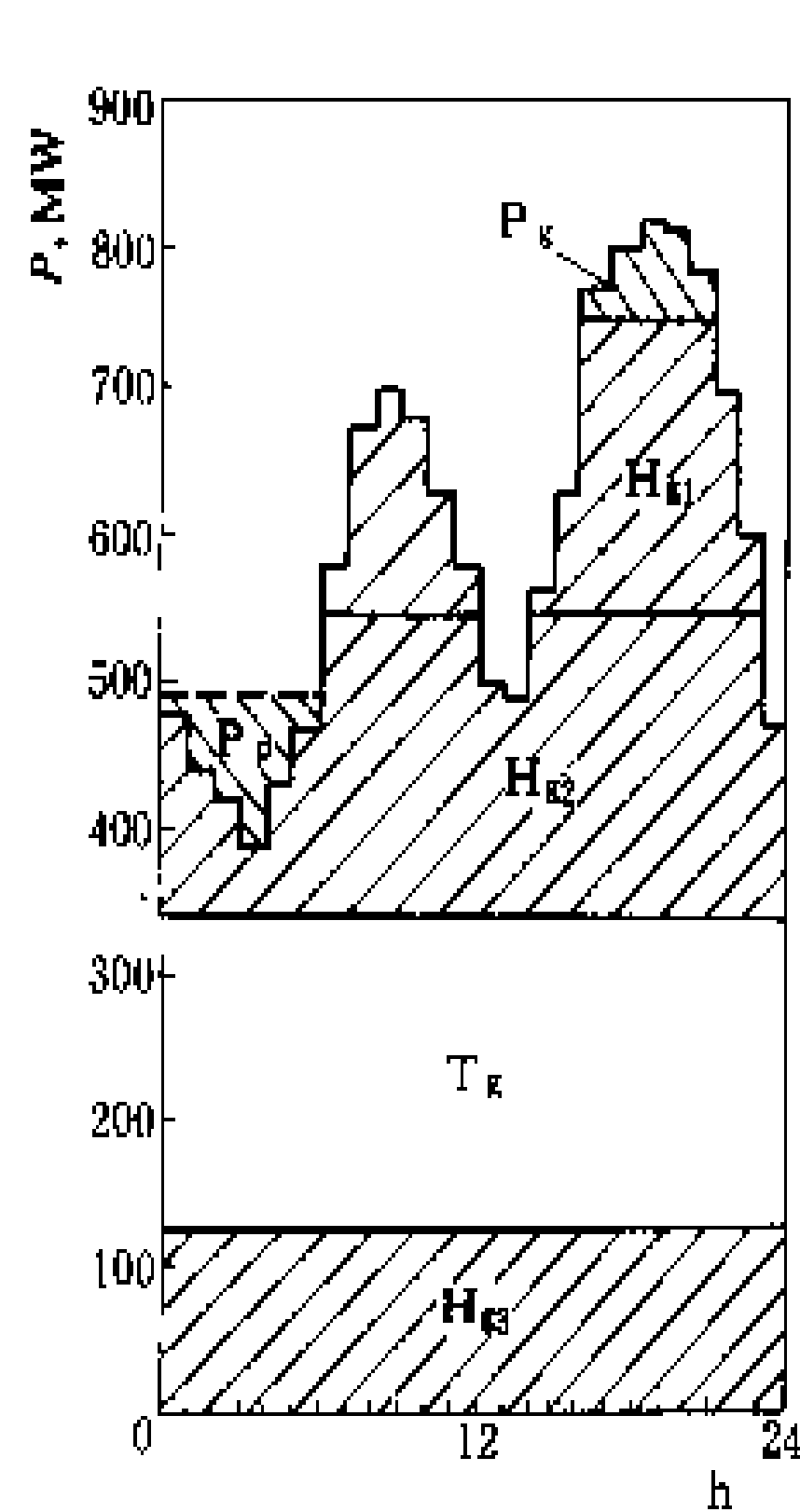


图 1 日负荷图及水电站日运行方式

P_k 抽水蓄能电站带峰荷; P_p 抽水蓄能电站抽水; H_{g1} 水电站带峰荷; H_{g2} 水电站带腰荷; H_{g3} 水电站带基荷; T_k 火电厂带基荷

来,增加工作日的能量和出力,使火电厂以较均匀的出力工作,叫周调节。进行周调节的水电站,应具有足够的周调节库容。研究水火电站周的运行方式,较严格的方法宜用一周七天的日负荷曲线进行,原则和方法与日运行方式类似。当缺乏周负荷曲线时,或为了简化计算,对进行周调节的水电站,可将其周平均出力乘以大于 1 的周调节系数,化为周最大负荷日的日平均出力,据以研究日的运行方式。水电站的周调节系数即为其周不均衡系数的

倒数。计算水电站周调节系数时,应满足下式

$$E_s/\sigma_s = E_b/\sigma_h + E_t/\sigma_t$$
$$E_s = E_h + E_t$$

式中, E_s , E_b , E_t 分别为电力系统、水电站及火电厂周电量; σ_s , σ_h , σ_t 分别为电力系统、水电站及火电厂周不均衡系数。例如某电力系统 $E_s = 50$ 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, $\sigma_s = 0.92$, $E_b = 20$ 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 为维持火电站小修,取 $\sigma_t = 0.98$, 则可求得 $\sigma_h = 0.843$, 相应其周调节系数为 1.19。

图 2 中表示出水电站担负周负荷的变动部分,火电厂担负固定部分。月运行方式可以周运行方式来代表。

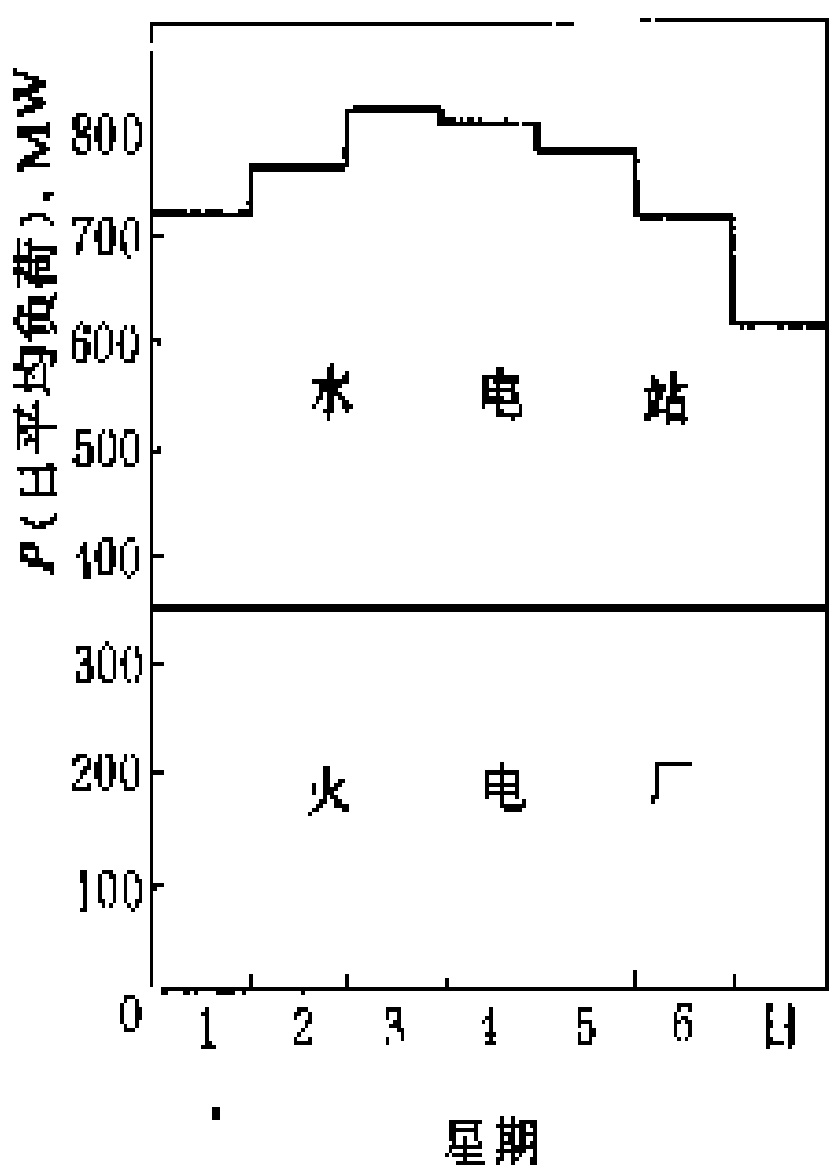


图 2 日平均周负荷图及水电站周运行方式

(3)系统年负荷特性及水电站的年运行方式。电力系统年负荷,通常以月最大年负荷曲线及月平均年负荷曲线来表示。西方国家也有用一年 52 周

的周最大年负荷曲线及周平均年负荷曲线来表示。年负荷曲线又有静态和动态两种。静态负荷曲线是按负荷的年增长,在年初以台阶形发生,而不是在年内均匀增长,即年初最大负荷等于年末最大负荷,而下一年初的负荷比前一年末的负荷大了一个“台阶”。动态负荷是按年内均匀增长处理,即年末负荷大于年初负荷。由于日照随季节而变化,形成照明负荷夏天小冬天大,故在照明负荷比重较大的系统,具有冬天大夏天小的特性。有些系统由于排灌负荷或夏天制冷负荷的影响,也可能形成排灌季节或夏天较大的“驼峰”。电力系统年平均负荷除以年内月平均负荷的最大值,所得之商,叫年不均衡系数,常以 ρ 表示,在无季节性负荷时,按静态的负荷曲线,中国较大的电力系统的 ρ 值约为0.9~0.95。有季调节以上能力的水电站,其出力在年内的分配,应尽量适应系统负荷在年内的变化。以降雨径流为主的水电站,枯水多发生在冬春季。为充分发挥水电站的容量和调峰效益,故在冬春季枯水时担负系统的尖峰负荷;在夏天水多时担负系统的基荷或腰荷;在一年中季节性负荷下降时,多安排电站机组检修。若夏天安排一定的季节性用户,有利于充分利用水能资源。年负荷图及水电站年运行方式见图3。图3显出水电站在枯水季节尽量担负年负荷变动部分,使火电厂按均衡出力工作,在汛期由于来水丰富,水电站以较大的出力运行。

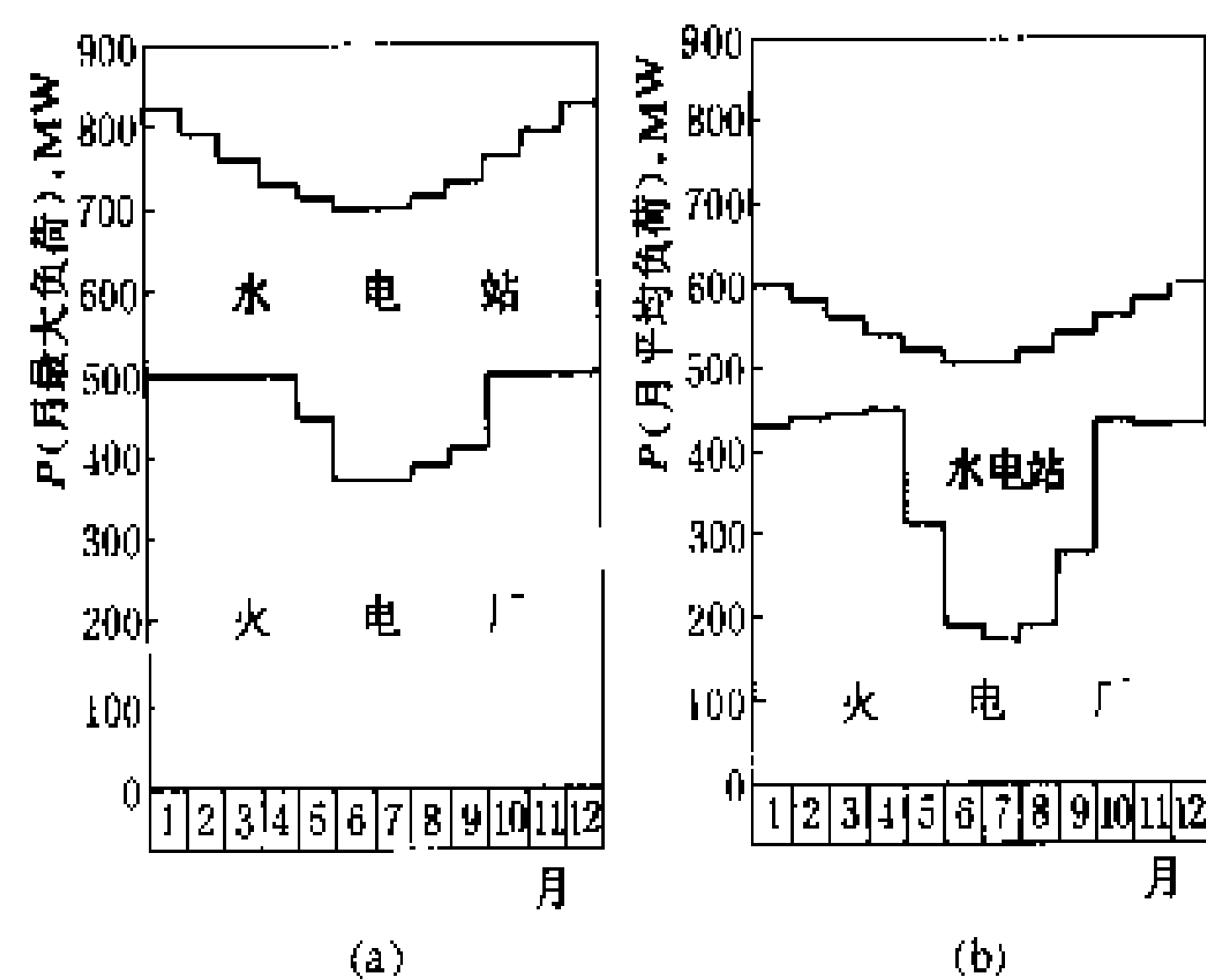


图3 年负荷图及水电站年运行方式(静态)
(a) 月最大负荷; (b) 月平均负荷

水电站调频运行方式 水电站随时调整所带的负荷,以适应系统负荷的随机跳动,使系统供电频率维持在允许范围的运行方式。由于水电站起停灵活,增减负荷迅速,能较好地跟踪负荷,担负调频任务。一般情况下,宜由水电站调频。只当汛期水电站以全部出力带基荷时,才将调频任务转移到火电厂。担负调频任务水电站的机组,其所带的最大计划负荷应小于其预想出力(最大可能出力)。预想出力与所带最大计划出力之差值的一部分或全部,可作调频之用,叫旋转备用方式。

担负调频的容量叫做负荷备用容量。

水电站备用运行方式 水电站担负由于系统其他电站机组事故停运或输电线路故障而被甩掉的负荷的运行方式。担负这部分负荷的容量叫做事故备用容量。由于水电站起停灵活,增荷迅速,故能较好地担负系统事故备用。

水电站担负系统事故备用,可分正常备用与短期备用两种。正常备用是备用容量的运行时间需延续到事故处理完为止,水电站需预留在事故运行时间基荷工作的相应水量,按中国有关规范规定,应为10天基荷的水量。备用水量若由上游库预留,则本库应预留与上游库放水流达本库的时间相应的水量。短期备用是正常备用由火电厂以热备用(运行机组)或冷备用(熄火机组)方式担负,当系统其他电站机组被迫停运或输电线路故障时,先由短期备用的水电机组担负被甩负荷,至正常备用火电厂担负这部分负荷为止,需预留的备用水量较少。

水电站机组担负系统事故备用的方式有两种:①旋转备用方式,即由运行机组预留一部分容量,担负被甩负荷;②停机备用方式。旋转备用方式的容量比例应不小于该水电站总备用容量的1/2。

水电站调相运行方式 水电站不带负荷,当调相机用。对于安装高程较低的反击式水轮机的水电站,有时需考虑用空气压缩机将水压离转轮室,使水轮机不带水转动。(见水轮发电机组调相)

(伍宏中)

shuidianzhan zhaodu

水电站照度 (illumination of hydropower station)

入射在物体单位面积上的光通量。用来表明物体被照亮的程度,单位是勒克斯(lx)。为了满足不同场所工作面照明的需要,许多国家专门制订了照度标准,并以最低照度作为评价标准。最低照度通常是指距地面0.8 m处假定工作面上的水平照度,或者是指实际工作面上的垂直照度,这样规定有利于正常工作和保护工作人员视力。照度计算方法有利用系数法、逐点计算法和单位容量估算法三种。①利用系数法考虑了直射光及反射光两部分产生的照度。利用系数表示室内照明投射到工作面上的光通量(包括直射光和反射光)占照明器中光源发出的总光通量的百分数,由照明器的特性、房间的大小和形状、空间各平面的反射系数等条件决定,适用于照明器均匀布置,电光源采用白炽灯、荧光灯、荧光灯发光带时计算工作面上的平均照度。②逐点计算法一般用于计算某些特定点的照度,当装有多多个照明器时,则计算点的照度应为各个照明器对该计算点产生照度的总和。③单位容量估算法

shui 水

是根据实际经验确定的不同场所单位面积照明装置容量范围,用来粗略估算确定场所的照明容量,适用于不要求精确计算照度值,且照明器为均匀布置的场合。

见用电卷照度标准。

(邱景安)

shuidianzhan zhaoming

水电站照明 (lighting for hydropower station) 水电站用照明器发出的光照亮工作场所或工作面。水电站的照明器利用电能转换为光,包括电光源及反射器两部分。电光源种类有白炽灯、荧光灯、卤钨灯、氙灯、高压钠灯、金属卤化物灯及混光灯等,反射器类型有搪瓷反射器、乳白玻璃漫射罩、铝抛光反射器等,可根据使用场所的要求及环境条件合理选用。

照明种类 包括工作照明及事故照明两类。工作照明是水电站各工作场所在正常工作时需要的照明,其中包括警卫照明、障碍照明及检修照明。事故照明是电站事故或当工作照明的交流电源因发生故障中断时,用来供给值班人员继续工作或安全疏散用的照明。水电站事故照明电源正常由交流电供给,交流电源故障时通过交直流电源自动切换装置切换至直流供电,或由带有逆变装置的电源供电。中、小型水电站可采用应急电源供电。中央控制室一般设 1~2 盏直流电源供电的常明灯。

照明方式 分一般照明、局部照明及混合照明。①一般照明要求在整个被照面上(包括工作面及非工作面)均达到必要的视觉条件,因此照度基本均匀。对于识别对象在工作面上密度很大而对光照方向又无特殊要求,或工艺上不宜装设局部照明装置的场所,宜单独使用一般照明。②局部照明仅局限于工作部位固定的或移动的照明。对于局部需要高照度并对照射方向有要求的场所宜采用局部照明,如主机室的机旁盘或配电盘盘后、试验室试验台、机修车间工作台等。③混合照明由一般照明与局部照明共同组成,此时一般照明照度宜按不低于混合照明总照度的 5%~10%选取,且最低不小于 20lx。

照明供电 中小型水电站通常采用照明与动力由共用的厂用变压器供电,以简化厂用电接线与布置,但当厂用电压波动大时将影响照明质量和灯泡寿命。大型水电站宜采用照明与动力分开供电方式,调峰电站由于厂用电电压波动大,需采用有载调压的照明变压器以保证照明电源质量。照明供电电压交流为 380/220 V,直流为 220 V。检修照明为交流 36 V 或 24 V,以确保人身安全。

见用电卷电气照明。

(邱景安)

shuidianzhan zidong dianya kongzhi

水电站自动电压控制 (automatic voltage control of hydropower station) 按预定条件和要求自动控制水电站母线电压或全电站无功功率的技术。它是按维持电站高压母线电压在一定水平或按给定全电站无功功率的要求,进行机组间无功功率分配的。机组间的无功功率的分配一般要考虑:①无功功率的调整首先由调相运行的机组承担,剩余的部分由参加无功调节的机组分担。②运行机组间的无功功率一般按机组承担无功负荷的能力成比例地分配。③考虑各机组有功负荷的大小,按一定的功率因数分配机组的无功功率。④当电站的升压变压器带有有载调压抽头时,机组的无功功率的调整要与变压器的抽头调节相配合,一般在调整变压器抽头之前,应最大限度地利用发电机的电压调整范围。⑤要考虑机组的最大和最小无功功率的限制。

单独的自动电压控制装置一般采用模拟式。在水电站采用计算机监控系统时,自动电压控制功能纳入水电站计算机监控系统。

(梁见诚)

shuidianzhan zidong fadian kongzhi

水电站自动发电控制 (automatic generation control for hydropower station) 按预定条件和要求自动控制水电站有功功率的技术。它是在水轮发电机组自动控制的基础上,实现全电站自动化的一种方式。根据水库上游来水量或电力系统的要求,考虑电站及机组的运行限制条件,以经济运行为原则,确定电站机组运行台数、运行机组的组合和机组间的负荷分配。在完成这些功能时,要避免由于电力系统负荷短时波动而导致机组的频繁起、停。(见水电站厂内经济运行)

自动发电控制的依据 自动发电控制的依据一般有:①按上游来水量。它适用于无调节水库的径流电站,使电站最大限度地利用上游来水量,以不弃水或少弃水为原则,尽量保持电站在较高水头下运行。②按给定的发电负荷曲线或实时给定的电站总有功功率。这是在电力系统统一调度下,电站参加电力系统的有功功率和频率的调节,完成上级调度下达的计划性或随机性的发电任务。③按维持电力系统频率在一定水平下运行。根据电力系统的频率瞬时偏差或频率偏差的积分值,确定电站的总出力,直接参加电力系统的调频任务。④按综合因素。诸如按给定功率和电力系统频率偏差、按电力系统对功率的要求和下游用水量的需要等。

自动发电控制限制条件 在完成自动发电控制任



务时需要考虑各种限制条件：①机组及主设备的健全状况。②机组的出力限制、汽蚀振动区等的工作条件。③电力系统对电站要求的备用容量。④上、下游水位限制及下游用水量要求等。

发展过程 在水电站自动化发展过程中，先是使用单功能装置以完成其中的部分任务。在 20 世纪 20 年代末即已出现自动操作器，以解决水电站的工作条件改变时，自动确定运行机组最优台数及组合问题。其后，发展了频率和有功功率成组调节装置，以解决机组间的负荷分配问题。由于这些装置的应用，提高了水电站自动化水平和经济效益，可提高水电站运行效率约为 1%。这些装置过去都是用继电器式和模拟式设备来实现，调节精度低、考虑的条件有限、只能用简单的或近似的控制规律，因而功能和结构都比较简单。近年来采用计算机技术来实现，把各种因素综合考虑，实现最优控制，整体地完成自动发电控制的任务。在采用计算机监控系统的水电站，一般都把自动发电控制作为监控系统任务之一，不需单独设置装置。

(梁见诚)

shuidianzhan zidonghua

水电站自动化 (automation of hydropower station) 采用机械、电子设备，按预定要求代替人工进行水电站生产作业的技术。它自动地对水电站进行控制、监视、调节和管理，达到提高水电站运行的安全性、经济效益、劳动生产率和供电质量的目的。

自动化内容 主要包括单机自动化(见水轮发电机组自动控制、调速器和水轮发电机励磁)、公用设备自动化(见水电站公用设备自动控制)、全厂综合自动化(见水电站自动发电控制、水电站自动电压控制及水电站计算机监控系统)和梯级电站自动化(见梯级水电站集中控制)。若从功能上分，则主要包括自动控制、安全监视、经济运行、维持电力系统稳定运行和运行管理自动化等。

自动控制 机组附属设备及全厂公用设备按各自系统分别控制、自动维持压缩空气、压力油、供水、排水等系统的压力、液位、流量等参数在正常工作范围内。在此基础上实现单机自动化，即水轮发电机组的自动控制、有功功率和无功功率的自动调整，进而实现全电站的自动控制和梯级水电站集中控制。

安全监视 对电站机电设备的运行状态和主要运行参数进行连续监视，使设备运行在容许工作范围，遇有异常，发报警信号，而遇有危及设备安全的事故则除发报警信号外，应使设备停止运行。此外，还对电站的上游水位、压力钢管等进行监视，以保证电站厂房和水

工建筑物的运行安全。

经济运行 水电站根据电力系统的要求、上游天然来水量和水库调节能力等，实行水库经济调度、梯级电站经济运行、电站内运行机组最佳组合和机组间的负荷经济分配。

维持电力系统稳定运行 在电力系统运行过程中，当受到小干扰时，电站将按预定规律维持电力系统的电压和频率水平。在电力系统发生事故而造成有功功率缺额时，将调相运行的机组快速转为发电运行或自动投入备用机组；频率过高时自动切除机组；电压过低时，机组进行强行励磁。抽水蓄能机组在电力系统负荷变动时，自动进行填谷或调峰。

电站运行管理自动化 包括：自动收集、处理电站运行参数，定期制表打印；自动统计主、辅设备的运行时间、动作次数，以便合理安排检修；进行事件顺序记录、事故追忆等，以便分析、处理事故；电站与上级调度所自动交换信息。

自动化目的 自动化的目的在于提高电站运行的安全性、经济性、劳动生产率和供电质量等。

提高电站运行的安全性 自动控制系统具有完善的闭锁，严格的逻辑操作顺序，保证了正确控制和调节，避免人为的误操作和误判断。对设备运行进行周密监视，及时发现异常或隐患。在发生事故时，把事故局限于最小范围，维持电站和电力系统的正常安全运行。

提高经济性 水库优化管理、梯级电站联合调度和厂内经济运行，都可明显地提高水能利用率。单机自动化加快了工况变换过程，减少水量的消耗。同时由于备用机组能迅速起动，从而可减少电力系统的旋转备用容量，使电力系统其他机组尽量运行于高效率区。经验数据表明，自动化可使水电站增加发电量达 4% 左右。

提高劳动生产率 实现自动化集中管理，使值班人员从日常的监盘、抄表、人工操作等工作中解脱出来，进一步提高电站的科学管理水平，减少人员，降低运行费用，改善工作条件。

提高供电质量 水电站具有出力调节能力强、反应速度快、机组工况转换时间短的特点。大型机组可以在 1~2 min 从静止状态起动到并网运行，出力可在 10 余秒钟内从空载调到满载，有些抽水蓄能机组可以在 1 分多钟从满载抽水转到满载发电。因此自动化水电站对维持电力系统的频率和电压水平、调节电力系统功率的余缺，维持电网连续供电起到重要的作用。

发展简史 自动化水电站在 20 世纪 20 年代在美国、瑞士等国家即已出现。第二次世界大战后，发展较快。50 年代，机组自动控制一般都是用继电器逻辑回路实现。60 年代，采用了分立电子元件和固态电子组



件构成的无触点控制装置。80年代,推广微机监控单元和可编程序控制器实现单机自动化。50年代,水轮发电机组的调速器和励磁装置向着电气液压调速器和晶闸管励磁装置方向发展,近年调节部分已开始采用微处理机为基础的数字式调节器。

40年代,电站运行一般采用在中央控制室和机旁现地两级值班,即除中央控制室外,主机室还设少量值班人员。50年代,大都取消机旁现地值班,而采用中央控制室集中值班方式,只是一些大型电站还有采用两级值班的。50年代后期,水电站开始实现无人值班,由上级调度所或梯级调度所遥控,在工业发达国家中,无人值班或少人值班的水电站已占绝大多数。

计算机的应用使水电站自动化进入一个新的发展阶段。60年代初,计算机已用于梯级水电站或水电站群的集中监控和水情测报等方面。70年代,采用计算机进行运行监视、数据处理、经济运行、制表打印等的水电站日渐增多,特别是抽水蓄能电站,大都采用计算机监控系统。计算机监控是水电站自动化今后发展的主要方向。

(梁见诚)

shui donglixue

水动力学 (hydrodynamics) 研究水及其他液体的运动规律及其与流场边界相互作用的学科,为流体力学的分支。水动力学研究的基本问题是:在给定液体的作用力、边界条件和运动起始条件下,确定液体的运动状态,及其对边界物体的作用力。在水动力学学科形成初期,曾主要研究忽略粘滞性的理想液体运动;而在实际液体流动中,粘性阻力不容忽略,故近代水动力学则主要研究粘性液体运动(见水力学)。

水动力学的内容,按研究对象分为恒定总流和非恒定总流两类。按液体性质分为粘性液体和理想液体两类。

恒定总流 表述液体运动规律的基本方程是一维恒定总流的连续方程、能量方程和动量方程。

(1) 恒定总流的连续方程。

$$Q = VA = \text{常数} \quad (1)$$

式中 Q 为流量; A 为过水断面面积; V 为断面平均流速。连续方程是液体为连续介质的前提下,物质守恒基本定律在水动力学中的表现形式。

(2) 恒定总流的能量方程。即 D. I 伯努利 (D. I. Bernoulli) 方程,其形式为

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_{w(1-2)} \quad (2)$$

式中 Z 为位置水头; $\frac{p}{\gamma}$ 为压强水头; $\frac{\alpha V^2}{2g}$ 为流速水头;

α 为断面上流速分布不均匀的动能修正系数; $h_{w(1-2)}$ 为断面 1 至断面 2 间的水头损失。式 (2) 表示液体的位能、压强和动能之间的平衡与转化的关系,是能量守恒基本定律在水动力学中的表现形式。

(3) 恒定总流的动量方程。常用直角坐标系中 3 个分量的表示式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\gamma Q}{g}(\alpha_2 V_{2x} - \alpha_1 V_{1x}) &= \Sigma F_x \\ \frac{\gamma Q}{g}(\alpha_2 V_{2y} - \alpha_1 V_{1y}) &= \Sigma F_y \\ \frac{\gamma Q}{g}(\alpha_2 V_{2z} - \alpha_1 V_{1z}) &= \Sigma F_z \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中下标 1, 2 和 x, y, z 表示断面 1 或 2 的平均流速在直角坐标系中的分量; $\Sigma F_x, \Sigma F_y, \Sigma F_z$ 表示作用在断面 1 至断面 2 之间的液体上所有外力在 x, y, z 三个方向投影的代数和; 动量方程表示外力与液体流动之间的关系,是牛顿定律 $\Sigma F = ma$ 在水动力学中的表现形式。

非恒定流总流 河渠中洪水演进及水电站引水系统中的流量变化属于非恒定流动,其连续方程和能量方程如下。

(1) 非恒定总流的连续方程。在无侧向人流时可写为

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

式中 x 为沿流向的坐标。该方程表示流量沿程的增加率等于过水断面随时间的减小率。

(2) 非恒定总流的动量方程。

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\alpha V}{g} \times \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{g} \times \frac{\partial V}{\partial t} = S_0 - S_f \quad (5)$$

式中 h 为水深; S_0 为河底比降; S_f 为摩阻比降。式 (4) 和式 (5) 即为圣维南方程组。

自然界的实际液体流多为三维不可压缩粘性液体运动,其基本方程组如下。

(1) 连续性方程。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

(2) 运动方程。即纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \times \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \times \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (7)$$

式中 u 为流速; F 为单位质量力; ρ 为液体密度; μ 为液体粘度; p 为动水压强。

对于理想液体,上式 (7) 略去粘性项,则简化为欧拉 (Euler) 方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

$(i, j=1, 2, 3)$ (8)

上列偏微分方程组,一般情况下难以直接求解,实际应用时常按具体情况进行各种简化。

参考书目

清华大学水力学教研组. 水力学 上册. 1980 年修订版. 北京: 人民教育出版社, 1981

(余常昭)

shuifeng shuidianzhan

水丰水电站 (Shuifeng Hydropower Station) 位于中朝界河鸭绿江干流的下游, 中国辽宁省宽甸县和朝鲜平安北道朔州郡境内。下游距中国丹东市约 70 km。该电站为中朝两国共有, 由朝鲜负责运行管理, 电量两国各半分配。原设计电站装机容量 630 MW, 多年平均年发电量 34.8 亿 kW·h, 保证出力 320 MW。6 回 220 kV 输电线路向中朝两国送电。大坝为混凝土重力坝, 最大坝高 106 m。工程于 1937 年开始修建, 1941 年 2 台机组投产发电, 到 1945 年共有 6 台机组投入, 1958 年 7 台机组全部投产运行。1971 年, 中朝两国政府决定, 在各自境内扩建一座厂房, 各装 2 台容量为 67.5 MW 的混流式水轮发电机组, 从水丰水库引水发电。

水文和水库特征 坝址以上流域面积 47586 km²。多年平均年径流量 256 亿 m³。水库总库容 147 亿 m³, 具有多年调节性能。大坝的设计洪水标准为千年一遇洪水, 相应洪峰流量 50200 m³/s, 相应洪水位 127.4 m。校核洪水标准为万年一遇洪水, 相应洪峰流量 63100 m³/s, 相应洪水位 130.45 m。水库正常蓄水

位 123.3 m, 相应库容 121.1 亿 m³, 死水位 95.0 m, 死库容 41.8 亿 m³, 调节库容 79.3 亿 m³。防洪库容 25.91 亿 m³。电站设计水头 77.0 m, 最大水头 93.4 m, 最小水头 66.0 m。

枢纽布置 枢纽由大坝、电站厂房以及副坝等建筑物组成, 见图。

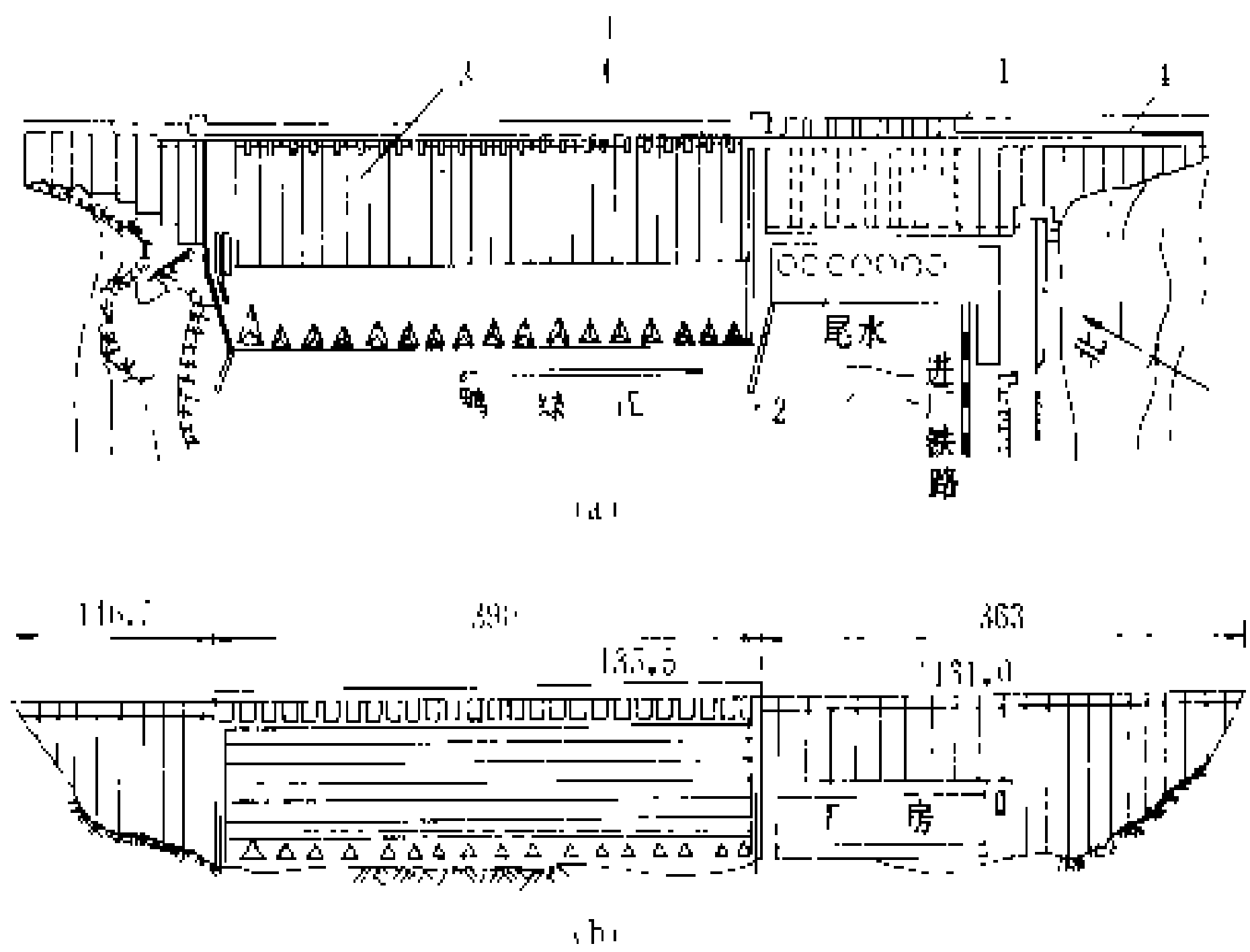
大坝基础 主要是花岗片麻岩, 伟晶花岗岩和斑岩。坝高 106.0 m, 坝顶高程 126.4 m, 防浪墙高 4.6 m, 坝顶长 900 m。河床中部和右侧为溢流坝。中部溢流坝设 26 个溢流孔, 每孔宽 12m, 高 7.3 m, 溢流堰顶高程 116.0 m, 设有平面定轮闸门。最大泄量 37650 m³/s。左岸副坝设有 10 个溢流孔作为备用溢洪道, 每孔宽 10 m, 高 9 m, 溢流堰顶高程 116.0 m, 设有平面闸门。最大泄量 17046 m³/s。

坝后式发电厂房, 位于河床左侧, 长 174 m, 宽 23 m, 高 51.2 m。坝内压力钢管引水, 钢管内径 5.0 m。进水口底坎高程 63.3 m, 设定轮平面闸门, 由固定式卷扬机启闭。厂房内安装 7 台混流式水轮发电机组, 单机容量 90 MW。1、4、5 号发电机为 50 Hz, 向中国送电。3、6、7 号发电机为 60 Hz 向朝鲜送电。2 号发电机为可变频率 50/60 Hz, 可向中朝两国送电。主变压器: 1~4 号为三相变压器, 每台容量 100 MV·A; 5~7 号为单相变压器组, 每组容量为 100 MV·A。

(谷云青)

shuigong hunningtu

水工混凝土 (hydraulic concrete) 以水泥、骨料和水, 按适当比例配制, 经混合搅拌, 硬化成型, 能满足水工建筑物结构要求的混凝土。水工混凝土主要用于水利、水电及航道港口等工程, 长年暴露于大气或深埋在水中, 经受日光、温度、流水及环境水等外界因素的影响和侵蚀。因此, 它除要具有一般普通混凝土的性能外, 还要根据其所处部位的工作条件, 分别满足抗压、抗渗、抗冻、抗裂(抗拉)、抗冲耐磨、抗风化和抗侵蚀等要求。例如, 坝体迎水面外部混凝土有抗渗和抗冻的要求; 泄水道的混凝土要能抵抗高速水流的冲刷、空蚀和泥沙磨损; 大体积混凝土要防止温度裂缝; 当环境水中含有的酸、盐等有害物质超过允许值时, 要求水工混凝土具有抵抗有害物质侵蚀破坏的能力等。为了满足这些要求, 对水工混凝土的原材料和水工混凝土的施工, 除与普通水泥混凝土同样的一般技术要求外, 还有一些专门的技术要求。



水丰水电站枢纽平面布置图

(a) 枢纽平面; (b) 下游视图

1—大坝; 2—厂房; 3—溢洪道; 4—备用溢洪道



对原材料的要求

(1) 水泥。水工混凝土除使用普通水泥外,还要针对不同性能要求的混凝土,使用不同性能的水泥。对水泥的要求主要有:①对大体积混凝土,要求用低发热量水泥,主要有硅酸盐大坝水泥和普通硅酸盐大坝水泥。②对有抗冲刷和抗冻要求的混凝土,优先采用硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥。③当环境水对混凝土有硫酸盐侵蚀性时,应选用抗硫酸盐水泥。④大体积建筑物的内部混凝土,位于水下的混凝土和基础混凝土,宜选用矿渣硅酸盐大坝水泥等。⑤选用的水泥标号应与混凝土设计标号相适应。对于低标号混凝土,可在现场掺用适量的掺和料。建筑物外部水位变化区、溢流面和经常受水流冲刷部位的混凝土,以及受冰冻作用的混凝土,其水泥标号不宜低于 425 号。

(2) 骨料。水工混凝土可选用天然骨料、人工骨料、或两者互相掺用。对骨料的要求主要有:①砂的细度模数宜控制在 2.4~2.8 范围内,天然砂宜按粒度分级。②粗骨料按粒径分级,中国 SDJ 207-82《水工混凝土施工规范》的规定,分为 5~20 mm、20~40 mm、40~80 mm、80~150 mm (或 120 mm) 四级。对少筋或无筋混凝土结构,应选用尽可能大的最大粒径。③砂石骨料中含有活性骨料时,必须进行专门试验论证。④骨料的质量要符合技术要求,对含泥量及其他有害物质含量等较普通水泥混凝土要求更严。

(3) 水。水工混凝土对水质的要求与一般普通混凝土相同。凡适用于饮用的水,均可用以拌制、养护混凝土。

(4) 掺和料。为改善混凝土的性能,合理降低水泥用量,宜在水工混凝土中掺入适量的掺和料,掺用部位及最优掺量应通过试验确定。水工混凝土较普遍掺用的掺和料是粉煤灰。对非成品原状粉煤灰要求的品质指标是:①烧失量不超过 12%。②干灰含水量不得超过 1%。③三氧化硫(水泥和粉煤灰总量中的)不得超过 3.5%。④0.08 mm 方孔筛筛余不得超过 12%。

(5) 外加剂。水工混凝土对外加剂的主要要求有:①为改善混凝土的性能,提高混凝土的质量及合理降低水泥用量,必须在混凝土中掺加适量的外加剂,其掺量通过试验确定。②常用的外加剂有减水剂、加气剂、缓凝剂和早强剂等。根据施工需要,对混凝土性能的要求,及建筑物所处的环境条件,选择适当的外加剂。③有抗冻要求的混凝土必须掺用加气剂,并严格限制水灰比。④如需要提高混凝土的早期强度,宜在混凝土中掺用早强剂。工业用氯化钙只宜用于素混凝土中,其掺量不得超过水泥用量的 3%。为避免氯化钙腐蚀钢筋,在钢筋混凝土中应掺用非氯盐早强剂。

对施工的要求

(1) 正确选择混凝土的配合比。主要要求有:①选择配合比时,除应满足各项强度设计要求外,还应满足施工和易性的要求,并采取措施合理降低水泥用量。②为确保混凝土的质量,工程所用混凝土的配合比必须通过试验确定。③对于大体积建筑物的内部混凝土,其胶凝材料用量不宜低于 140 kg/m³。④混凝土的水灰比(混凝土单位用水量与单位胶凝材料的重量比值。单位胶凝材料重量为每立方米混凝土中水泥与掺和料重量的总和)。应根据设计对混凝土性能要求,通过试验确定,并不超过最大允许值。中国 SDJ207-82《水工混凝土施工规范》规定的水灰比最大允许值见表。

水灰比最大允许值

混凝土所在部位	基础部位	非基础部位
上、下游水位以上(坝体外部)	0.6	0.65
上、下游水位变化区(坝体外部)	0.5	0.55
上、下游最低水位以下(坝体外部)	0.55	0.60
基础	0.55	0.60
内部	0.70	0.70
受水流冲刷部位	0.50	0.50

(2) 水工混凝土在拌和、运输、浇筑、养护过程中,除与一般普通混凝土相同的质量控制要求外,有时还有一些专门要求,如:①控制混凝土浇筑温度(混凝土经过平仓振捣后,覆盖上层混凝土前,在 5~10 cm 深度处的温度),高温季节时,浇筑温度不能过高,低温季节又不能过低。②为有利于混凝土浇筑块的散热,基础和老混凝土约束部位、浇筑块厚以 0.75~1.5 m 为宜。③对混凝土浇筑的分缝尺寸、分块高度、相邻坝块的高差及浇筑间歇时间等均应根据具体施工条件加以限制。

(3) 对大体积水工混凝土,需采取混凝土温度控制措施,以防止产生温度裂缝,主要措施是减少混凝土热量、降低浇筑温度,加强浇筑块散热和表面保护等。

(4) 低温季节施工时,必须有专门的施工组织设计和可靠的防寒保温措施,以保证混凝土满足设计规定的强度增长的要求。

(章景安)

shuigong jianzhuwu

水工建筑物 (hydraulic structure) 为开发、利用和保护水资源,减免水害而修建的受水作用的建筑物。作用在水工建筑物上的水体是静止的或流动的,有侵蚀性的或无侵蚀性的。水的作用主要为力的作用,有静水压力、动水压力、浪压力、冰压力、渗压力、浮托力等。此外还有其他物理的和化学的作用,包括:水流的空蚀、磨蚀、冲刷、水的冻融、渗流对岩土的内



部冲刷和化学溶蚀及淤塞、侵蚀性水对建筑物的侵蚀作用等。水工建筑物还承受自重、土压力、温度、地震等作用。

类型 按其功能分为：壅（挡）水建筑物（阻挡水流、壅高水位）、泄水建筑物（有控制地安全泄放具有势能的水流）、输水建筑物以及整治防护建筑物。按其用途分为：水力发电、航运、灌溉、防洪、渔业等类水工建筑物。按使用期限分为永久水工建筑物和临时水工建筑物，前者在工程运用期间长期使用；后者只在水久建筑物施工或检修期间使用。永久建筑物按其在工程中的重要性又可分为主要建筑物和次要建筑物，前者失事后将造成下游灾害或严重影响工程效益，如坝、水电站厂房等；后者失事后不致造成下游灾害或对工程效益影响不大，并易于修复，如导流墙、护岸等。按主要建筑材料可分为混凝土、砌石、土石、金属材料等水工建筑物。

特点

(1) 水工建筑物承受水的各种作用，并受洪水影响，其工作条件在很大程度上受地形、地质、水文等自然条件的制约，且多处于水下或水流中，损坏后不易修复，因而要因地制宜地根据具体条件加以设计，一般要求较高的可靠度。

(2) 水工建筑物，如大坝、运河等往往对自然环境和社会发展有很大的影响。

(3) 常需在河、湖、海等水域中施工，需导流和排干施工基坑或在水下施工，一般工程量巨大，常需机械化施工。

(4) 设计水工建筑物均需根据规范规定，按建筑物的重要性、级别、结构类型、运用条件等，采用一定的洪水标准，保证遇标准以内的洪水时建筑物的安全。水工建筑物的运用条件一般分为正常和非常两种。正常运用采用设计洪水标准；非常运用采用校核洪水标准。洪水标准多以洪水的重现期或出现的概率表示，如百年一遇洪水（出现的概率为1%）。非常重要的水工建筑物有时以可能最大洪水为校核洪水标准。

水工建筑物分级 水工建筑物根据破坏可能产生的后果（危及人的生命、造成经济损失、产生社会影响等）的严重性，按照规范规定分为不同的级别。对不同级别的水工建筑物，在下列方面有不同的要求：①抵御洪水能力，如洪水标准、安全超高等。②强度和稳定性，如建筑物的强度和抗滑稳定安全系数、限制裂缝的要求等。③建筑材料，如品种、质量、耐久性等。④运行可靠性，如建筑物各部分尺寸裕度大小和设置观测设备等。中国 SDJ12-78《水利水电枢纽工程等级划分及设计标准（山区、丘陵部分）》和 SDJ217-87《水利水电枢纽工程等级划分及设计标准（平原、滨海部分）》的

法规中将水工建筑物分为五级；苏联 СНиП II-50-74《建筑法规》分为四级。

（董育坚）

shuigong jianzhuwu yuanying guance

水工建筑物原型观测 (prototype observation for hydraulic structure)

对水工建筑物及其环境进行仪器量测和巡视检查，以了解和评价其实态的技术。通过水工建筑物原型观测，可以及时掌握水工建筑物在施工期和运行期的实际变化状态，作为施工控制及安全监控之用，并为验证和改进工程的设计和施工，为研究工程的维修或加固，为发展水工建筑物理论和技术提供基础资料。

工作内容 包括观测系统的设计，仪器设备的安装埋设，现场观测及数据采集，观测资料的整编、整理、分析、预报和作出评价等方面。

(1) 观测系统的设计。包括确定观测项目、选定重点观测的断面和部位，确定观测设备的布置及结构设计，进行仪器设备的选型并确定其规格和数量，制定安装埋设的技术要求及规范，绘制整编有关图表文件。仪器布置要贯彻少而精的原则，有针对性，重点突出而又能反映全面情况。观测地点要求有良好的工作环境和交通条件。

(2) 仪器设备的安装埋设。这是原型观测工作成败的关键，一定要有专业队伍严格按照设计要求进行施工。安装埋设前要进行仪器设备的检查、调试和率定，做好安装前的准备工作。安装埋设后要妥善保护，使所有埋设件都能正常工作，并取得原始测值和考证资料。竣工后要绘制竣工图，填写考证表，编写竣工报告。

(3) 现场观测及数据采集。现场观测包括巡视检查和仪器量测两部分。仪器量测可以用人工测读，也可以用自动化数据采集系统测记。要根据规定的测次、时间、精度要求，由专人负责进行观测。在仪器埋设之初，就应由施工单位随即测读，并随时整理，在竣工后移交给运行单位，以保持资料的完整性。在采用自动化设备观测时，往往还要考虑人工观测的可能性，以保证自动化设备发生故障时，观测数据不致中断。要特别强调认真进行水库首次蓄水期间的观测，取得完整资料，这是极为重要的。

(4) 观测资料的整编、整理、分析和预报。观测的原始资料要整编成系统的资料永久保存。观测资料要及时整理分析，绘制各物理量的变化过程线，建立其相关关系，与设计值和类似工程进行比较，对异常测值分析其原因，找出其变化规律，提出采取有关措施的建议。要建立有关物理量的数学模型，进行计算并作出预报。施工期监测是施工控制的重要手段之一，要做到随

时测记,随时分析,验证和修改设计,指导施工,如隧洞施工的新奥法。运行期应结合巡视检查中发现的问题和观测成果,进行综合分析,评定水工建筑物处于正常、异常或险情的工作状态。

观测项目

(1)按照水工建筑物的类型,可分为混凝土坝原型观测、土石坝原型观测、地下建筑物原型观测、泄水建筑物原型观测等类别,其观测目的、观测项目及所用仪器设备各不相同。

(2)按照观测目标不同,可分为一般性观测和专门性观测两类。一般性观测项目是所有工程一般都要布设的项目,包括巡视检查、变形观测、渗流观测、应力应变及温度观测,以及为分析资料需要的上下游水位、雨量、气温等环境量的观测。此外,根据工程特性和工程所处的地形地质特性及工程的重要性,可有选择地增设一些专门性的观测项目,如近坝区岸坡稳定观测、地震反应观测、水力学观测、局部结构的应力应变观测、土压力观测等。

(3)按照观测手段的不同,可分为巡视检查、外部观测及内部观测等三类。巡视检查是由有经验的人员定期巡视,观察水工建筑物是否正常工作,有无缺陷和险情。外部观测是在水工建筑物表面设置标点系列,用光学或机械方法观测这些标点的三个方向的位移或倾斜,裂缝的发展和变化。水力学观测也是外部观测的一种。内部观测是在水工建筑物内部埋设仪器,用机械或电测方法引至坝外或廊道内的观测站,测读变形、应力、应变、渗透压力、温度等物理量。

发展简史 在 19 世纪末、20 世纪初已开始利用仪器对混凝土水工建筑物的变形、温度和应变进行观测。到 30 年代钢弦式和差动电阻式仪器相继出现,并在苏联的第聂泊(Днепо)河大坝和美国胡佛(Hoover)、大古力(Grand Coulee)等大坝上使用。这两类仪器一直延用至今。直到 50 年代,观测工作多半是研制、改进一些仪器设备,研究混凝土坝的温度状况和温控措施的效果,以及内部的应力和应变等问题。1959 年法国马尔帕塞(Malpasset)拱坝的失事,紧接着 1963 年意大利瓦依昂(Vaiont)拱坝库区大滑坡所造成的巨大损失,促进了原型观测对大坝安全监测作用的认识,同时也推动了坝基和坝肩的安全监测技术和岩石力学方面的研究。土石坝观测技术的发展大体上与混凝土坝类似。20 世纪 30 年代以前观测项目限于渗流量和坝表面的沉降。之后,特别是 60 年代以来,随着高土石坝的兴建,坝体表面及内部相结合的体系逐步形成,观测技术有了较大的发展。当前筑坝技术比较先进的国家在观测方面的主要经验和趋势是将建筑物和基岩视为一个整体建立良好的观测系统,并与有

经验的工程人员进行现场巡视检查相结合,有效地掌握建筑物的性态变化,同时开展量测基岩变形和渗流等方面仪器的研制工作,并应用反馈分析技术,建立适用的数学模型,可修改原来的设计和施工方案,达到提高设计和施工水平的目的。不少工程根据实际条件和技术力量,实现了部分或全部量测数据采集和处理自动化。中国从 50 年代初开始,在丰满、新安江、官厅、上犹江、响洪甸等水利水电工程上进行了原型观测。以后随着水利水电建设事业的发展,不仅在新建工程上普遍开展了观测工作,而且老的建筑物也增设或改造了观测系统。60 年代初中国也生产并使用了差动电阻式仪器。20 世纪 70 年代以后,为适应建筑物和岩体的观测,研制出遥测垂线坐标仪、测斜仪、多点位移计、激光测坝变形系统及自动量测系统等仪器和设备。混凝土坝、土石坝、地下工程、水力学等观测设备也都形成了系列。近年来观测资料的整理分析方面已推广使用了计算机。

(庄万康)

shuigong jiegou jingli moxing shiyan

水工结构静力模型试验 (static model test of hydraulic structure)

用结构模型研究水工结构在静力载荷作用下的应力、变形和安全度的实验技术。静力载荷包括建筑物自重、水压力、泥沙压力、温度应力等,是作用于水工结构上的主要基本载荷。一些动力载荷,如地震惯性力也可用拟静力法按静力载荷考虑。因此结构静力模型试验是一种基本的试验方法。

根据不同的研究对象和试验目的,可采用脆性材料和光测力学两种结构模型试验方法。脆性材料水工结构模型试验可用于研究混凝土结构的应力状态及破坏模型试验。光弹性试验对研究局部应力和应力集中现象特别有效。全息散斑水工结构模型试验技术可用于研究三维位移场。研究某些特别复杂问题时,可采用几种试验方法相互配合,也包括物理模型和数学模型相结合的研究方法。

水工结构静力模型试验一般采用正态模型,即在三维空间里完全几何相似。但在特殊情况下,有时也用变态模型。例如有加劲环的高压钢管模型,其加劲环的尺寸难以做到完全几何相似,可按变态模型处理。但每个变态模型都受到其前提条件的限制,应慎用。

在确定模型范围时,要注意适当的地基模拟范围,并选择适当的加荷方法。在不影响试验成果精度的前提下,确定模型具体结构及尺寸时可作合理的简化。20 世纪 60 年代以来,还发展了模拟复杂地基的技术。

参考书目

陈兴华等,脆性材料结构模型试验,北京:水利电

力出版社, 1984

(胡积龄)

shuigong jiegou kangzhen shiyan

水工结构抗震试验 (aseismic test of hydraulic structure)

在动态激励下,测定原型或模型水工建筑物的动态特性及各项物理参数的反应的实验技术。通过对试验数据的分析处理,以判断结构在地震作用下的抗震安全性。结构抗震试验及理论分析是相辅相成和相互检验的。虽然近代计算机和计算技术发展迅速,但对某些复杂的水工结构,其抗震计算数学模型的建立和求解方法远非都已解决,仍需通过试验加以验证和改进,基本动态特性参数也往往要由试验提供。因此结构抗震试验仍是水工抗震研究的重要手段和途径。近代考虑固体和流体的耦合,结构和地基的相互作用,将物理模型和数学模型相结合,把试验装置和计算机联合在一起作联机试验,都是水工结构抗震试验的新动向。

试验内容 包括:①确定结构的动力特性及其地震反应。②研究结构的地震破坏特性和机理。③验证所采取的结构抗震或加固措施的有效性。④为抗震结构计算提供必要参数及检验其数学模型和方法的正确性。

试验设备

(1)现场原型水工结构动力试验的激振方式有:①机械式起振机,或电液式、电磁式激振器对结构进行迫振激励。②采用张释法、爆破、撞击或小火箭冲击等方法激励结构的自由振动。③利用大地天然脉动激励结构自由振动。

(2)室内水工结构抗震模型试验的加载设备有:①机械式、电液式或电磁式振动台,包括可模拟地震时实际地面运动的三向六自由度振动台。②单点或多点激振的电磁式或电液式激振器,包括伪静力试验加载系统。③可同时模拟重力场及地震振动的土工离心机等。

(3)量测设备。采用各类传感器测定结构的动态位移、速度、加速度、动应力、动水压力、孔隙压力等反应。测量信号通过放大、滤波等装置后,由计算机采集或直接由笔式、光线示波器或磁带式等记录器直接记录,再进行分析处理。试验室模型试验中还可采用动光弹、激光全息摄影等技术。近代愈来愈多地应用各种电子设备,特别是电子计算机及其各项外部设备,使试验周期缩短,并可大大提高测试精度。

(陈厚群)

shuigong jiegou moxing shiyan

水工结构模型试验 (hydraulic structural

model test) 根据相似准则,在按一定比尺缩小的模型上模拟原型水工结构的力学现象,以研究水工结构的应力、变形和安全度的实验分析技术。将模型中测得的物理量,再按相似关系换算为原型的对应量值,用以了解原型结构的特性(见水工结构试验相似理论)。结构模型试验可以同时考虑多种因素和复杂的边界条件,不仅能研究水工结构在载荷作用下弹性阶段的应力和变形问题,而且可以研究超载情况下的破坏发展过程和破坏形态,给人以直观的印象。因而在一些重要的水工结构(如拱坝、支墩坝、复杂地基上的重力坝、垂直升船机的塔柱结构、预应力闸墩等)的设计和研究中,得到广泛应用,并和计算分析方法相辅相成,互为补充,相互促进。结构模型试验也可为验证和改进设计理论和计算方法提供依据。

水工结构模型试验类型

(1)按作用载荷的特性,可分为水工结构静力模型试验和动力试验两大类,后者包括水工结构抗震试验。

(2)按研究阶段可分为线弹性模型试验和破坏模型试验(见水工结构破坏模型试验)。

(3)按模型范围和受力状态可分为整体模型、半整体模型和平面模型三种类型。①整体模型多用于研究空间结构,如拱坝、连拱坝等。②半整体模型用于研究独立坝段或局部结构,如大头坝、重力坝岸坡坝段等。③平面模型用于研究重力坝、空腹重力坝、隧洞、拱圈等平面问题。平面模型又分为平面应变和平面应力两类。

(4)按量测技术和模型材料不同,主要有以下几种:①脆性材料水工结构模型试验。②光测力学试验技术,包括光弹性试验、全息散斑水工结构模型试验(如全息光弹法、激光散斑、白光散斑等)、云纹法等。③其他,脆性应力涂层法、应变网格法、比拟法(如薄膜比拟、电比拟、电阻网络比拟)等。

量测技术 在静力结构模型试验中,主要测试的物理量是应力和位移,而动力试验中,主要测试结构物的自振特性及动力响应。测试方法有电学、光学、声学 and 机械等方法。(见水工结构模型试验量测技术)

发展简史 20世纪初期,美国J.S.威尔逊(J. S. Wilson)开始用橡胶制作重力坝断面结构模型。1930年美国垦务局(United States Bureau of Reclamation)用石膏硅藻土制作了当时世界上最高的胡佛(Hoover)坝的三维结构模型,并进行了试验。第二次世界大战结束后,在世界范围内大量兴建混凝土坝,因而在20世纪50年代和60年代水工结构模型试验发展比较迅速,有些工程甚至将它作为设计的唯一手段。在这个时期,模型试验技术也有较大进步。中国从50年代开始开展结构模型试验工作,而在70年代以来进



入发展的新阶段。在试验技术方面,地质力学模型得到了新发展,出现了全息干涉、激光散斑干涉等多种光测技术,数据的采集和处理也都实现了自动化。结构模型试验的主要缺点是试验周期长,工作量大,费用较高,技术难度也较高。今后在试验技术上要全面实现现代化,以缩短周期、提高精度和降低费用为目标,与理论分析和数值计算相结合,以解决比较复杂和重要的工程实际问题。

参考书目

Sabnis G. M. et al. Structural Modeling and Experimental Techniques. Prentice-Hall Inc., 1983

左东启等. 模型试验的理论和方法. 北京: 水利电力出版社, 1984

(胡积龄)

shuigong jiegou maxing shiyan liangce jishu

土工结构模型试验量测技术 (measuring technique for hydraulic structural model test)

用以量测土工结构模型承受载荷后的力、应力、位移、应变、破坏过程、自振特性、动力响应等物理量的变化。对静力模型试验,主要测试的物理量是应力和位移;对动力模型试验,主要测试的物理量是结构的自振特性及动力响应,包括位移、速度、加速度、激振力随时间的变化等。测试方法主要有电测、光测、机测和声测法。近代对测量数据的采集和处理已实现自动化,振动信号的处理和波形分析也通过电子计算机进行。

电测法 其基本原理是将被测的非电物理量转变为电量,用电子仪器进行量测,并可用电子计算机进行数据处理。电测法的特点是灵敏度高,量程大,便于遥测遥控,可自动记录和数据处理、图象显示等,而被广泛应用。电测系统一般由传感器、量测电路、显示记录、数据处理等几部分组成。传感器是直接与被测结构物联系,接收被测物理量并转化为电量的部件,有电阻应变片、钢弦式、电感式、差动变压器式等种类。在脆性材料土工结构模型试验中普遍采用电阻应变片作为传感器,用专门胶结材料将其粘贴固定在模型测点上,当模型受力变形时,电阻敏感元件的长度、截面等将随着发生变化,从而使电阻发生相应变化,且在一定范围内其长度方向的应变 ϵ 与电阻变化率 $\Delta R/R$ 成线性关系,即 $\epsilon = k\Delta R/R$, 式中比例常数 k 称为灵敏系数,在一定范围内为常数,可通过率定试验求出。用电阻应变仪测出应变值后,即可由应力应变关系换算成应力值。电阻应变片还可粘贴在专门设计的变形元件上,制成各种用途的传感器。电阻应变计的电阻变化易受温度影响,因此必需进行温度补偿。在使用长导线或与电阻应变仪的电阻不匹配、灵敏系数不相同的应变计时,对

量测结果要进行修正。

光测法 通过测定光学参数以确定模型应力、应变和位移的技术。在测定模型应力时常用的是光弹性试验,特别适用于研究应力集中区和三维内部应力问题。随着试验技术的发展,现在已有进行弹塑性应力分析的光塑性法,用来解决平面的应力分析问题的全息光弹性法,以及云纹法等。位移的光测法有测量面上位移的散斑干涉法,测三维位移的全息散斑法等。(见全息散斑水工结构模型试验)。光测法具有非接触式、高灵敏度、高精度、信息量大等优点而得到日益广泛的应用。

机测法 用机械式仪器量测位移的方法。脆性材料结构模型试验中常用百分表、千分表测量位移,具有稳定、可靠、耐用等特点,但需人工测读,不便于自动化。

声测法 近代用声发射技术监测模型中裂缝的发生和扩展。

参考书目

傅梦莲主编. 实验应力分析. 北京: 知识出版社, 1984

(胡积龄)

shuigong jiegou maxing shiyan xiangsi lilun

土工结构模型试验相似理论 (theory of similitude in hydraulic structural model test)

土工结构试验中原型和模型之间相似关系的理论。据此可以建立原型和模型各有关物理量之间的关系。设计模型时严格遵循有关的相似理论,才能在模型上重现原型结构的力学现象,取得可靠的试验成果。在建立相似关系时,相似现象的同一物理量之比,称为相似比或相似常数;所有相似常数之间,存在着某种关系,称为相似指标;与此对应,相似现象各物理量之间也存在某种关系,称为相似准则或相似判据。

相似定理 建立相似准则或相似判据是以相似定理为依据的。相似定理有以下三条。

(1)相似第一定理,指出描述原型与模型两个相似现象的数学方程式相同。彼此相似的现象的相似指标等于1,其相似准则为一不变量。

(2)相似第二定理,又称白金汉(Buckingham) π 定理,指出当不能用数学方程式描述所研究的物理现象时,可用量纲分析的方法建立各有关物理量之间的相似准则。

(3)相似第三定理,又称单值条件相似律。所谓单值条件相似系指物体的几何特性、介质特性(即物理参数)、边界条件和运动初始条件的相似。

相似准则 在土工结构模型试验中,要求变形完

全相似,即原型和模型相应点的变形相似常数应该等于几何相似常数。这就要求原型和模型材料的泊松比相等,且原型和模型相应点的应变值相等。由此可建立一条重要的相似准则。

$$C_E = C_V C_L$$

式中 C_E 、 C_V 、 C_L 分别为弹性模量相似常数、体积力相似常数、几何相似常数。对弹性阶段的小变形问题,可不满足上述完全相似条件。

对水工结构静力模型而言,其相似准则还包括

$$C_\sigma = C_F$$

$$C_\sigma C_E = C_\sigma$$

$$C_\sigma C_L = C_\delta$$

式中 C_σ 、 C_ϵ 、 C_δ 分别为应力相似常数、应变相似常数、位移相似常数。

对破坏模型试验而言,必需考虑变形完全相似条件,但在某些特定条件下,也可放宽要求。

对动力模型试验而言,除要考虑几何条件、物理条件和边界条件相似外,还要考虑运动条件相似。

(胡积龄)

shuigong jiegou pohuai moxing shiyan

水工结构破坏模型试验 (model test of hydraulic structural failure) 根据相似理论,通过结构模型试验了解水工结构的破坏形态和破坏机理的实验技术。通过破坏模型试验,可以了解结构本身的极限承载能力或安全度,并能直观地看到破坏的发生和发展过程,从而找出结构的薄弱环节,为改善结构设计提供依据。1945年法国先在现场进行过一个高3m、长9m、厚20cm的小拱坝的破坏试验。接着意大利、葡萄牙相继开展了室内的水工结构破坏模型试验。在20世纪50年代国际上进行了较多的破坏试验,中国是在20世纪50年代末、60年代初开始进行这种试验的。

相似条件 破坏模型试验除应满足一般相似关系外,还有以下要求:①原型与模型相应点的应变相等。②原型与模型材料强度完全相似,即其莫尔(Mohr)强度包线相似。③原型和模型材料应力应变关系全过程相似。实际上很难找到同时满足上述②、③条件的模型材料,因而试验结果常常是近似的。可按照预计的破坏机理,抓主要因素,对试验成果进行修正。

加载方法 通常用超载加荷的方法使结构发生破坏。对水工结构来说,主要的载荷是自重和静水压力,所以破坏试验中一般只考虑这两种载荷。对混凝土坝加载方式有以下三种:①自重和水压按比例同时超载。②自重和水位不变,用不断增大加荷液体的容重的方法实现水压超载。这种方法给出的破坏形态比较符合

实际情况,应用得较多。③自重不变,用提高水位、增加水头的方法实现水压超载。

超载安全系数 结构破坏模型试验中安全系数 K 的表达式为 $K = P'/P$ 。式中 P' 为结构破坏时承受的总外载荷; P 为结构承受的总设计载荷。为了反映超载后结构破坏程度及破坏过程,通常用初裂安全系数 K_1 和完全丧失承载能力的安全系数 K_2 分别表示这两个阶段的安全度。

(胡积龄)

shuigong jinshu jiegou weixiu

水工金属结构维修 (maintenance of hydraulic metallic structure) 对水电站水工系统金属结构进行日常维护、损坏部件的修复、防腐处理等工作。目的在于保证设备安全可靠运行及延长其使用寿命。水工系统金属结构包括拦污栅、工作闸门(包括事故闸门)、检修闸门、启闭机、清污机以及闸门槽、门框等。

日常维护 包括定期对设备进行清扫、检查、防腐处理、润滑油脂补充、变质油脂更换、易损部件及设备的更换处理等。

当补充设备内的润滑油脂时,应注意要与原油脂的技术性能相同,不得随意掺混以防变质而影响设备的运行,如果发现润滑油脂已经变质则应当彻底更换。启闭机用的吊杆或钢丝绳应进行防腐处理,对钢丝绳表面应涂油,钢丝绳应无断股,在中国按能源部行业标准 DL409-91《电业安全工作规程(电力线路部分)》的要求,如发现有断股应进行更换。一般弧形闸门启吊钢丝绳浸泡在水中,其在水位变化段的范围极易发生锈蚀、断股等问题,所以需要定期进行定期检查。

损坏部件的修复 对金属结构部件的损坏件修复时,需参照原来的设计进行,如果认为原设计有缺陷,是造成设备损坏的原因,应当作出修改设计方案,经审批后才能进行实施。对于易磨易损部件应当参照原设计备有备件,以便在维修中发现损坏时能及时更换。

防腐处理 由于金属结构布置在户外、水下,特别是处于水面变化范围内的部分,工作条件差,锈蚀较普遍。金属结构产生锈蚀的原因,主要是结构本身的电化学性能不均匀、日光照射影响、高速水流冲刷、风浪冲击以及水中飘浮杂物、泥沙及冰凌对构件表面的磨损等的综合作用,从而损坏构件的原有防腐层。此时结构表面由于电位不均匀,形成许多腐蚀原电池,电位相对较负的为局部阳极,电位相对较正的为局部阴极,阳极区铁离子溶解于电介质,放出电子经基体跑向阴极区,在阴极表面被电介质中的溶解气或其他的极化物所夺取,生成氢氧离子(OH^-),氢氧离子再与阳极溶解的



铁离子结合,即生成铁的氢氧化合物(即铁锈),因此为化学腐蚀范畴。

针对引起腐蚀的原因,防护上可以采取的措施有涂料防腐、金属喷镀防护层以及外加电流阴极保护与涂料的联合防腐等。

(1) 涂料防腐。首先应彻底清除金属表面的铁锈,使涂料能与母材充分牢固地结合以提高防腐效果。由于各地区金属结构所接触的水质以及其它影响条件不完全一样,所以应按具体条件采用与其相适应的涂料,从而提高其使用周期。如果在构件除锈以后,先作一次磷化处理,再刷涂料,将可以增强涂料对母材的附着力而延长涂料使用寿命。

(2) 金属喷镀保护层。喷镀保护层可以起隔水作用,并起牺牲阳极的阴极保护作用。金属喷镀材料可以是锌或铝,一般多采用锌,因为金属锌与钢铁有良好的电连接,当处在同一电介质中,由于锌的电化学活动性比铁要活泼,溶解于水(即牺牲)的电子向附近基体移动,距锌一定距离处,电子聚集到一定程度,构件钢铁即成为整体阴极而得到保护,锌则是阳极而消耗。在锌喷镀后的外层仍可采用涂料而达到进一步增强其保护的作用。

(3) 外加电流阴极保护。根据化学腐蚀原理,采取外加直流电源,正极通入专设的辅助阳极,负极连接金属构件,即形成阴极保护系统,通过调节保护电流,可以使构件上的许多腐蚀原电池的腐蚀电流抵消,使构件成为一个整体阴极而得到完全保护,达到防止腐蚀目的。采用外加电流阴极保护与涂料联合保护,可以使涂料不易受破坏,并可使电流保护降到较低值,达到经济与长效的目的。

(杨承沪)

shuigong moxing shiyan

水工模型试验 (hydraulic model test)

按比尺缩小的模型中复演与原型相似的水流,进行水工建筑物各种水力学问题研究的实验技术。在制作天然河道或各种水工建筑物的水力学模型时,要按水力相似准则进行模拟。这些相似准则一般有重力相似、粘滞力相似、弹性力相似、表面张力相似、压力相等,而以表述重力相似准则的 W. 弗劳德 (W. Froude) 定律最为常用。此外还有空化水流、温差异重流等特殊情况的相似准则(见水力相似原理)。根据水力相似原理,还可将模型中量测到的水力要素换算为原型的水力要素(见水力要素测量)。通过模型试验,可进行工程布置和方案的比较,建筑物过流表面的体型优化,下游消能防冲等问题的研究,以解决实际工程问题,并发展水力学理论。

水工模型试验的类型

(1) 按模型的范围分有整体模型、单项整体模型和断面模型。整体模型模拟整个水利、水电枢纽及其上、下游邻近河段的全部水流,主要应用于水利、水电枢纽布置设计方案的验证、优选和优化试验,泄水建筑物上、下游水流衔接、消能防冲、防淤的试验,过坝建筑物上、下游引航道水流条件的试验等。整体模型采用的比尺一般为 $1:50 \sim 1:150$ 。单项整体模型模拟单项水工建筑物的水流,主要应用于各类泄水建筑物、水电站进水口、引水建筑物等的体型布置、过流能力、水流条件、消能效率等的试验,调压室波动试验,压力管道的水击模型试验等。单项整体模型的比尺一般采用 $1:20 \sim 1:100$ 。断面模型模拟水工建筑物的一部分水流,可在透明水槽或水管中进行试验。主要应用于过流边界压力及脉动压力试验、二元水跃消能防冲试验等。断面模型的比尺多为 $1:10 \sim 1:50$ 。

(2) 按模型水平比尺和垂直比尺是否相同分为正态模型和变态模型。正态模型的水平和垂直比尺相同,为多数水工模型试验所采用。变态模型的水平和垂直比尺不同,以保持大范围水力学模型中有一定水深,主要用于河道或港湾的模型试验。水平和垂直比尺之比称为变率,一般在 $1:2 \sim 1:10$ 之间,如相差过大就可能改变模型中水流的流态、流速和压强分布。

(3) 按模型水流是否含沙分为清水模型和浑水模型,后者又称为泥沙模型试验,可应用于河道、水库、沉沙池、上下游引航道的泥沙冲淤试验。

(4) 按模型水面所受气压的大小分为常压模型试验和减压模型试验。常压模型试验的模型水面所受的气压为大气压力,适用于多数水工模型试验。减压模型试验的模型水面所受的气压低于大气压力,气压大小按模型比尺缩小,需将模型放置在减压箱内进行试验,适用于空化试验。

(5) 按河床水流边界是否固定分为定床模型试验和动床模型试验。定床模型试验中的水流边界是固定的,不受水流冲淤的影响,而动床模型试验中河床的水流边界由可冲刷材料组成,以研究河床以及泄水建筑物下游地形的冲淤变化。

试验方法及程序

(1) 模型的规划设计和制作。按所研究问题的性质和任务,选定模型的类型和比尺,进行模型的设计。在试验场地,用水泥、砂石、木材、钢材、塑料等材料或制品制作模型。

(2) 布置测试系统。按照模型试验要求,在预定区域或断面上布置测点,设置量测水位、流速、流量、压强、流态、地形的仪器设备,并取得原始测读数据。

(3) 进行预备试验。用已有资料验证模型中水流

是否与原型相似,必要时对模型进行修正,以保证其相似性。

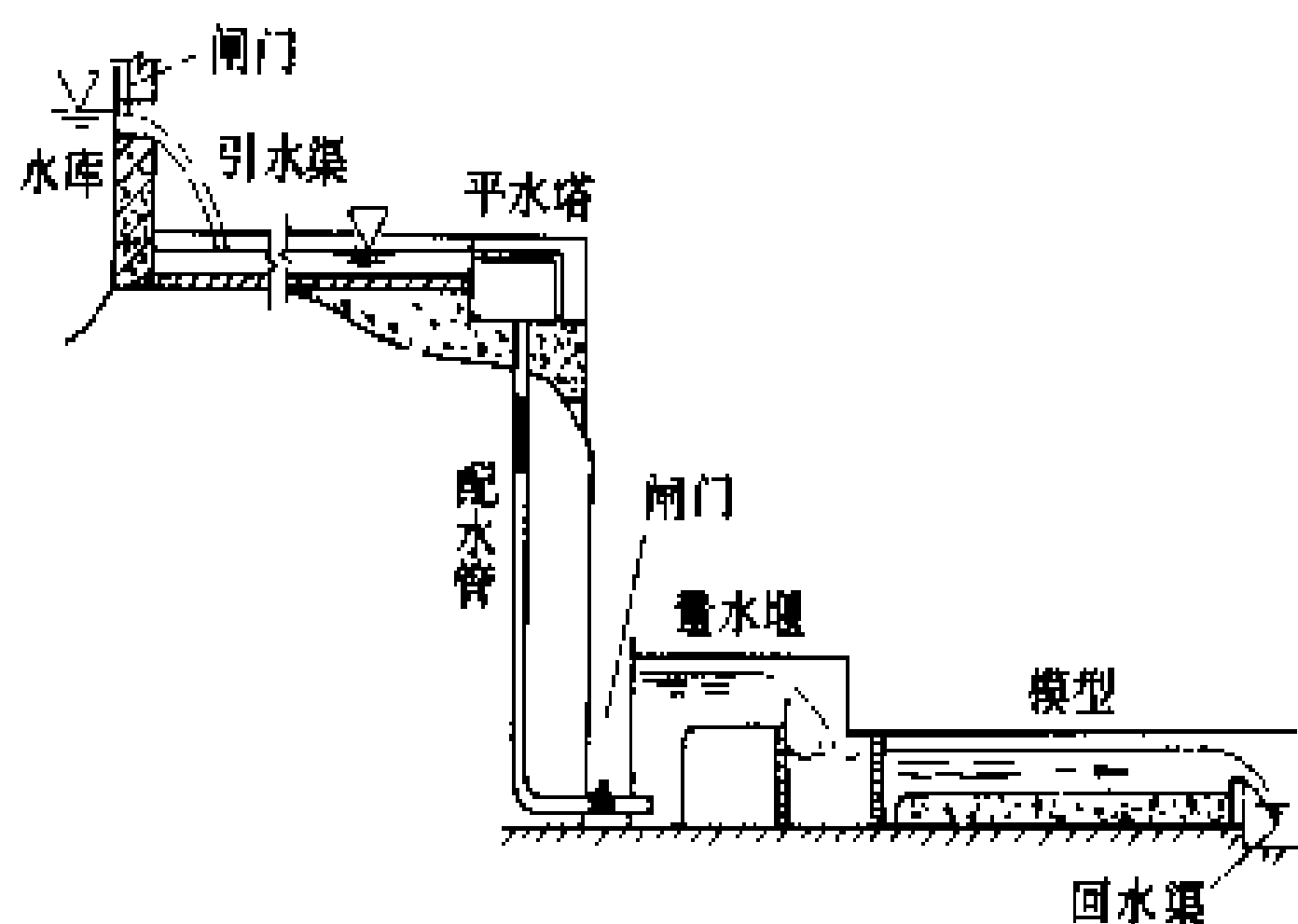
(4) 进行试验研究。如系工程试验,一般先进行原设计方案的试验,观察水流流态,量测各项水力要素。针对原布置方案的问题,参照已有工程经验及科研成果,对模型进行修改,逐步优化。最后对选定方案进行总结试验。对研究课题则按拟定的试验研究提纲进行。

(5) 分析资料,编写报告,提出相应的建议。

试验设备及仪器 包括试验场所、供水系统、专用设备和测量仪器等。

(1) 试验场所有:①室内试验厅,一般为综合试验大厅,可布置几个模型同时进行试验。②露天试验场,进行河工、港工及大型水利、水电枢纽的整体模型试验,需要较大的试验流量及场地,往往在露天试验场进行。③工程现场试验场所,可利用工程现场大流量、高水头等有利条件进行高速水流问题研究及在施工现场进行工程的导流截流试验。

(2) 供水系统,有自流式和循环式两种。①自流式供水系统利用闸、坝、瀑布及渠道的水位落差引水至试验室,试验后的尾水不再重复利用。②循环式供水系统包括蓄水池、平水塔、配水管、量水设备、回水管(槽)、沉沙池、水泵等,模型试验用水循环使用,见图。



循环式供水系统示意图

(3) 专用设备包括:①试验水槽,如进行二维水流试验的玻璃水槽,进行波浪试验的波浪水槽等。②活动水槽,即底坡可以变动的水槽,用以研究糙率、推移质、高速水流掺气等问题。③高水箱,用于进行泄洪洞、坝身深孔进水口及深水闸门水力学特性、掺气减蚀及振动等的试验研究。④减压箱、循环水洞、文图里管等。

(4) 量测仪器,有测针、测压管、测压计、毕托管、文图里流量计、量水堰、自动水位仪、压力自动巡回检测仪、电磁流量计、测速仪(光电式、旋浆式、热线-热膜式、激光式)、水下地形测量仪(电阻式、光电式

及超声波式)、脉动压力传感器、掺气浓度仪、振动加速度仪等。多数仪器要经过率定,保证试验所要求的精度。目前已开发出用微机对试验进行自动控制及对量测数据自动采集和处理的系统。

发展简史 1870年W.弗劳德(W.Froude)首先按水流相似准则进行了船舶模型试验。1885年O.雷诺(O.Reynolds)利用重力相似准则进行了河口潮汐模型试验。1898年H.恩格斯(H.Engels)在德国建立了世界上第一座水工试验室,进行了河道模型试验。20世纪以来,水工模型试验技术得到更大的发展,各国建立了许多著名的水工试验室,如法国的夏都(Chatou)、荷兰的台尔夫特(Delft)、美国的陆军工程兵团水道试验站(Waterway Experimental Station)、苏联的全苏水工研究院(ВНИИГ)等。中国第一座水工试验所于1935年在天津建成,同年筹建了南京中央水工实验所。1949年以后,随着水利水电建设的发展,在中国各科研院所、流域机构、水利水电勘测设计院、高等院校都相继建立了水工试验室。

参考书目

水利水电科学研究院等编. 水工模型试验. 第二版. 北京: 水利电力出版社, 1985

(李桂芬)

shuǐ

水击 (water hammer) 压力管路内,液体流速急剧变化,引起压力剧烈变化的现象,也称水锤。水击分正、负水击及直接、间接水击。

水电站机组甩负荷,导叶突然关闭,在其压力管路中产生压力突增形成正水击;与上述情况相反,水轮机开机管路中产生负水击;导叶(或阀门)关闭或开启后的一段时间内,管路中可形成正、负水击交替变化。

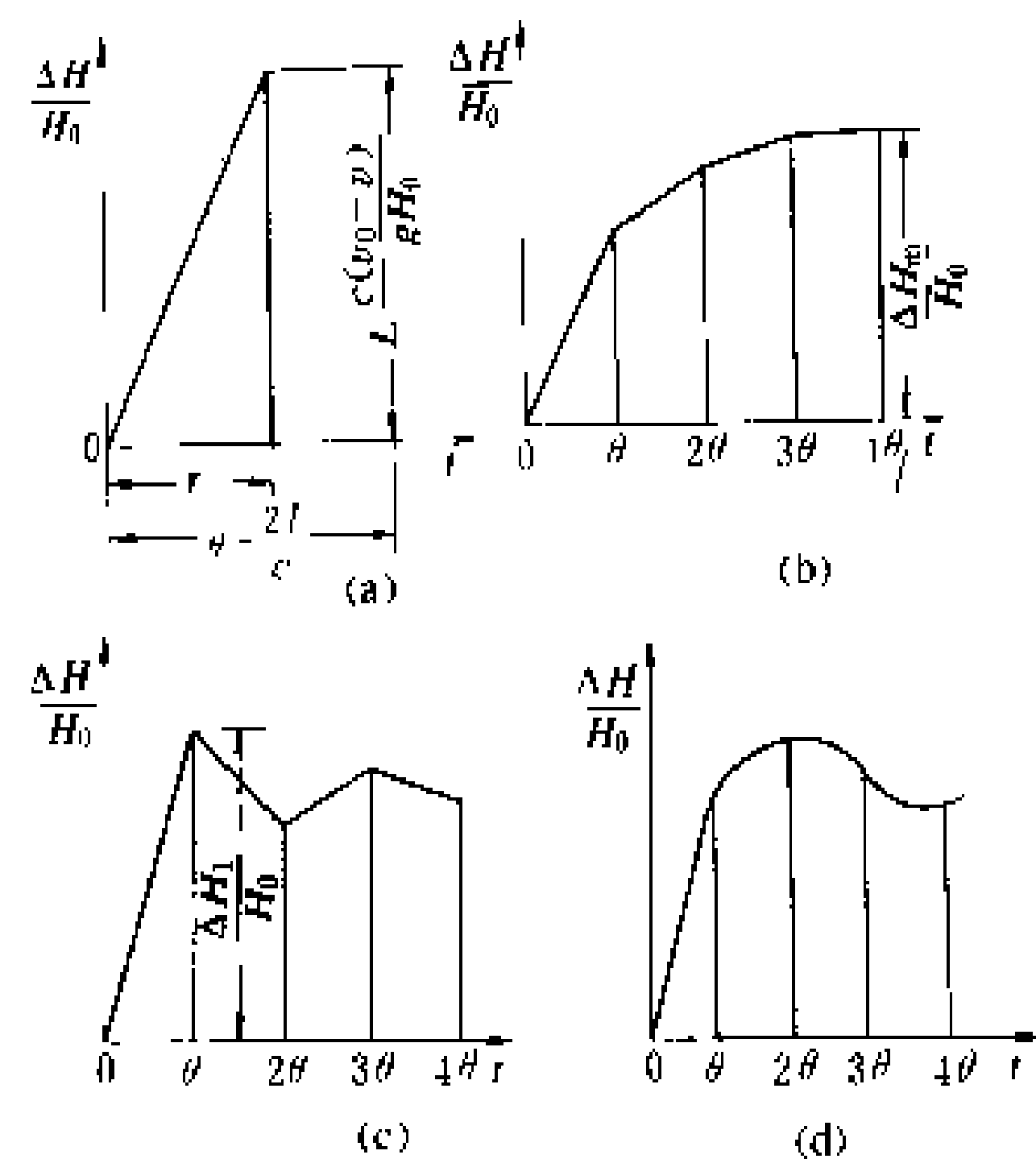
水击波在压力管路中的传播速度与液体及管壁的弹性有关,也与管径及壁厚的比值有关,刚度越大传播越快,其速度约在50~1100 m/s之间。产生于水电站阀门处的水击波为直接波,它逆水流方向传播至水体的静水面,然后反射折回,沿着水流方向,向阀门传播,反射波传播过程将不断抵消直接波产生的正、负压力变化。当水电站关闭或开启阀门的时间 T 小于水击在管路内往返传播一次的时间 θ (称为相),即 $T < \theta$ 时,阀门处出现的水击称为直接水击;当 $T > \theta$ 时,反射波传至阀门处,阀门尚未完全关闭或开启,于是该处水击压力得到了减弱,称为间接水击。

直接水击值由 $\Delta H = c(v_0 - v)/g$ 式计算,式中 v_0 及 v 分别为阀门关闭(或开启)起始时和终了时管路中的流速, c 为水击波传播速度, g 为重力加速度。不



同情况下水击压力随时间的变化见图，其中 $\Delta H/H_0$ 为水击压力相对值， H_0 为正常运行时的总水头。

水击最大值出现在末相末和第一相末的两种间接水击 [图 (b)、(c)]，可通过水流运动方程及连续方程积分求解，其它相末水击最大值 [图 (d)] 只能通过数值积分法求解。



水击压力相对值随时间变化示意图

(a) 直接水击；(b) 间接水击，末相末值最大；(c) 间接水击，一相末值最大；(d) 间接水击，它相末值最大

20 世纪 70 年代后，用计算机计算水击，可方便地考虑导叶开启或关闭的各种变化规律，能反映水轮机转速和效率变化对水击值的影响。

水电站和泵站的水击可导致管壁破裂和水、油泵及水轮机部件损伤；水电站长尾水洞的水击，可使水轮机转轮上抬，特别是负水击压力线低于管线超过 8 m 时，会产生水柱断裂，出现空化，随之而来的正水击，将产生极大的破坏力，故管线布置应在负水击压力线以下，并留有 2~3 m 安全高度。

参考书目

王树人，董毓新主编. 水电站建筑物. 北京：清华大学出版社，1984

(刘维德)

shuiji moxing shiyan

水击模型试验 (water hammer model test)

研究由于管道流量发生瞬时变化而引起管道内压力变化的水力学模型试验，也称水锤试验。在实际工程中，由于控制流量的闸门的快速启闭，特别是水轮发电机组甩负荷时，会使流量发生瞬时变化，从而引起管道内压力的急剧变化，不论是骤增还是骤减，都会影响工程的安全运行。所以许多大型水电工程在设计阶段都要进行水击模型试验，为采取合理的调压措施提供依据。

• 358 •

相似准则 水击的基本方程在忽略非线性项和摩擦项之后，其表示形式为

$$\frac{\partial u}{\partial t} - g \frac{\partial H}{\partial L} = 0$$

及

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \frac{a^2}{g} \frac{\partial u}{\partial L} = 0$$

式中 H 、 u 分别为管道瞬时水头，m；和流速，m/s； g 为重力加速度，m/s²； a 为水击传播速度，m/s； L 为沿管道距离，m； T 为时间，s。要使原型和模型间瞬变流相似，在水击方程中各项的原型和模型之比都应该相等，即 $(u/T)_r = (gH/L)_r$ ， $(H/T)_r = [(a^2u)/(gL)]_r$ 。同时还要求水击指数 σ 相等，即 $\sigma_r = (Lu/gHT)_r = 1$ 。由以上各式可推导出 $a_r = u_r = H_r^{1/2}$ ， $T_r = L_r H_r^{-1/2}$ ， $Q_r = (Au)_r = L_r^2 H_r^{1/2}$ ，式中 Q 为流量，m³/s， A 为面积。进行模型设计时，先按相似准则选定 L_r 及 H_r ，然后模型管材要按 a_r 比尺来选择，而快速闸门关闭时间按 T_r 选定。

试验设备 需要配置带有水平溢流槽的水库（或水箱），可变动开度和关闭时间的液压快速闸门、电阻式或压阻式压力传感器、光电示波仪或磁带记录器。试验时，水箱与管道相连接，根据原设计的闸门启闭工况，控制管道流量，测取管道中各部位的瞬时压力变化过程，并据以分析研究并提出各项数据供设计选用。

(李桂芬)

shui jinglixue

水静力学 (hydrostatics) 研究水及其他液体在静止(或相对静止)状态下的压强平衡规律及其应用的学科，主要研究静水压强的分布规律、作用在平面和曲面上的总压力以及浮体和潜体的平衡和稳定性等。

静水压强的分布 当作用在微小面积 ΔA 上的压力为 Δp ，静水压强 p 定义为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta p}{\Delta A}$$

静止液体中任意点沿各个方向的压强都相等。以完全真空为计算基准称为绝对压强；以当地大气压为基准称为相对压强。压强的度量单位为 N/m²，过去也常用液柱高度表示（如米水柱、毫米水银柱）等。

静止液体在重力作用下的压强分布用下式计算

$$p = p_0 + \gamma h$$

式中 p_0 为液面的压强； p 为液面下深度为 h 的点压强； γ 为液体的重度（单位液体的重量）；当液面压强为大气压时， γh 即为相对压强值。

液体的平衡微分方程 当作用于液体的质量力不仅是重力时，以直角坐标表示的为

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - X &= 0 \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - Y &= 0 \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - Z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 X, Y, Z 分别为单位质量液体所受各质量力的合力沿 x, y, z 三个方向的分量; ρ 为液体的密度。

静水总压力 通常分平面上总压力和曲面上总压力两种。

(1) 平面上的静水总压力。其值为 $p = p_c A$, p_c 为平面面积 A 的形心 C 点的静水压强, 总压力的方向垂直于平面, 其作用线与平面的交点 D 称为压力中心, D 点在 C 点之下, D 点的位置可按下式计算 (见图 1)

$$y_D = \frac{I_{xx}}{y_c A} = y_c + \frac{I_{xc}}{y_c A} \quad (2)$$

式中 y_D 为 D 点沿 y 轴方向的坐标, $I_{xx} = \int_A y^2 dA$ 为面积 A 对 x 轴的惯性矩, I_{xc} 为面积 A 对通过形心且平行于 x 轴的惯性矩。

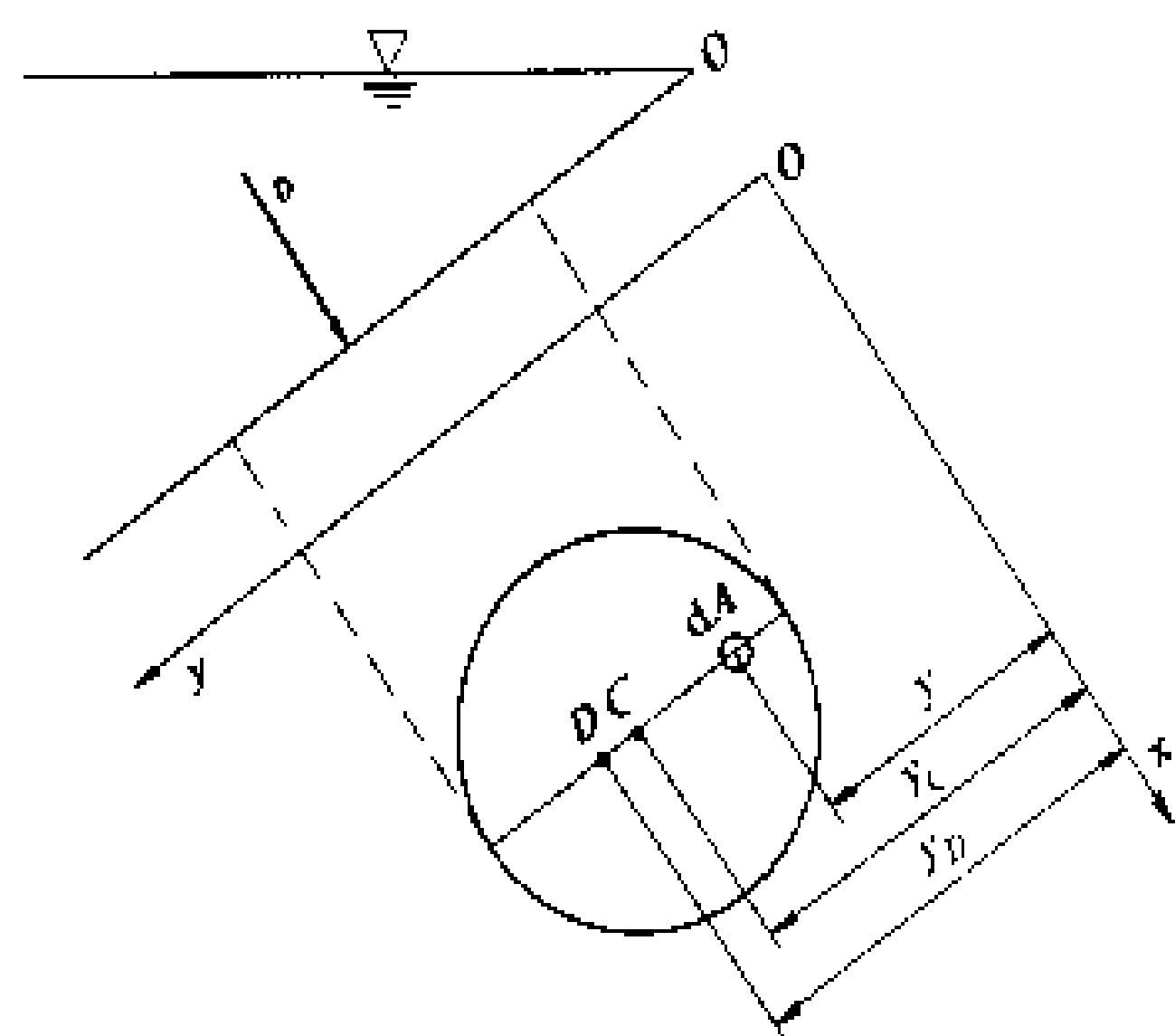


图 1 平面静水压力示意图

(2) 曲线上的静水总压力。工程上常见的是二向曲面。通常将二向曲面总压力 p 分解成水平分力 p_x 和垂向分力 p_z 计算 (见图 2)。水平分力 $p_x = \gamma h_c A_x$, 即

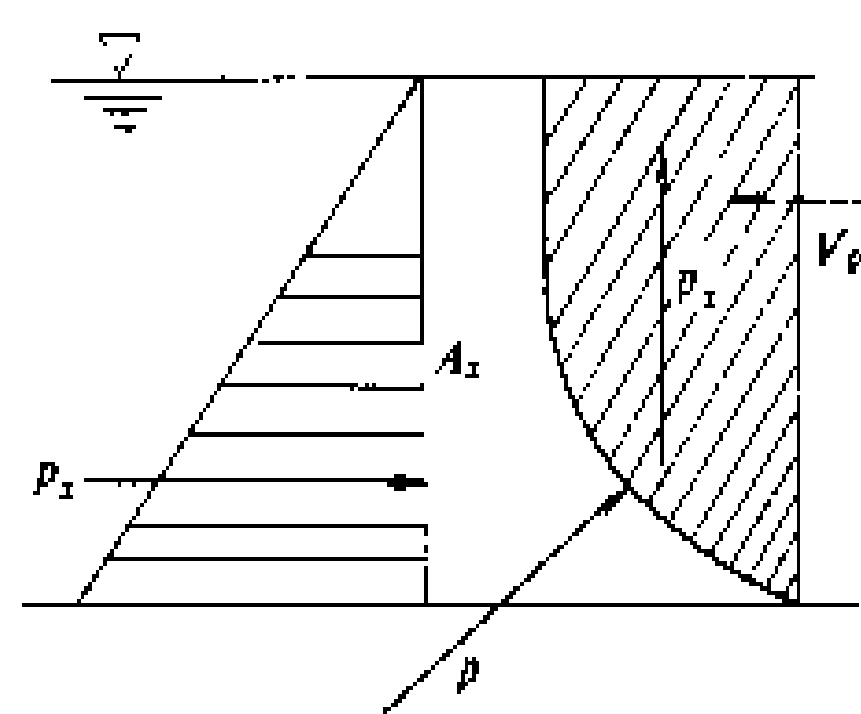


图 2 曲面静水压力示意图

等于作用在该曲面的垂向投影面上的静水总压力。垂向分力 $p_z = \gamma V_z$, 即等于压力体内的水重, 压力体 V_z

是指曲面本身以及它在水面 (或水面的延长面) 的投影之间的铅垂柱体, 如图 2 阴影线部分所示。

浮力 物体部分或全部浸没于液体中时所受液体向上的作用力。浮力的大小等于物体排开的那部分体积的液体重量, 这就是著名的阿基米德 (Archimedes) 原理。

参考书目

清华大学水力学教研组. 水力学 上册. 1980 年修订版. 北京: 人民教育出版社, 1982

(余常昭)

Shuikou Shuidian zhan

水口水电站 (Shuikou Hydropower Station)

位于福建省闽清县境内闽江干流上, 距上游南平市 94 km, 下距福州市 84 km, 以发电为主, 兼有航运、过木、防洪等综合利用效益。装机容量 1400 MW, 保证出力 260 MW, 多年平均年发电量 49.5 亿 kW·h, 用 220 kV 电压供电给福建省电力系统, 担负系统调峰任务。库区将形成深水航道, 年过坝货运量可达 400 万 t, 并可提高南平市防洪标准。大坝为混凝土重力坝, 最大坝高 101 m。水库淹没耕地 31394 亩, 迁移人口 63495 人。工程于 1988 年 4 月开工, 1993 年 8 月第一台机组发电。(参见彩图插页第 10 页 14 图)

水文和水库特性 坝址以上流域面积 52438 km², 为闽江总流域面积的 86%, 多年平均流量 1728 m³/s, 多年平均年径流量 545 亿 m³。千年一遇设计洪水流量 43600 m³/s, 设计洪水位 64.99 m; 万年一遇校核洪水流量 51800 m³/s, 校核洪水位 67.68 m, 总库容 26 亿 m³。水库正常蓄水位 65.0 m, 相应库容 23.4 亿 m³。汛期限制水位 61.0 m。最低消落水位 57.0 m, 调节库容 7 亿 m³。死水位 55.0 m, 相应库容 15 亿 m³。为不完全季调节水库。

枢纽布置 由大坝、厂房、通航建筑物及开关站等组成。河床左侧布置坝后式厂房, 右侧布置泄洪建筑物。右岸为通航过木建筑, 厂房左岸下游布置 220 kV 屋外开关站, 见图。

大坝建基于新鲜和微风化的花岗岩体上, 坝顶高程 74.0 m, 坝顶长 783 m。主要泄洪建筑有 12 孔 15 m × 22 m 的溢流表孔, 堰顶高程 43 m, 溢流前缘总长 243 m, 最大泄量 51640 m³/s, 采用挑流消能; 表孔两侧各设 1 孔 5 m × 8 m 的泄洪底孔, 底坎高程 20.0 m, 挑流消能。

坝后式厂房长 304.2 m, 宽 34.5 m, 高 68.2 m, 安装 7 台单机容量为 200 MW 的轴流转桨式水轮发电机组。水轮机转轮直径 8 m, 额定水头 47 m, 最大水头 57.8 m, 最小水头 30.9 m, 额定出力 204 MW, 额

定转速 107 r/min, 最大效率 95%, 设计点效率 94.5%。发电机为伞式空冷型, 额定电压 13.8 kV, 额定容量 222.2 MV·A, 额定功率因数 0.9。电站进水口底坎高程 25.0 m, 压力钢管直径 10.5 m, 采用坝内斜管布置。副厂房分设于主厂房上下游。220kV 主变压器和预留的 500 kV 主变压器位置均布置在厂坝间副厂房顶层。220 kV 屋外开关站位于厂房附近左岸, 场地尺寸为 120 m×91 m, 平台高程 70 m, 出线 8 回, 接入福建电力系统。500 kV 屋外开关站的预留场地, 位于左岸下游。

通航建筑物为一线三级连续船闸和一线垂直升船机, 总提升高度 57 m。船闸位于溢流坝右侧, 闸室有效尺度为 160 m×12 m×3.0 m (长×宽×吃水深, 下

施工。二期围堰拦断主河槽。上游围堰最大堰高 44.55 m, 采用土石围堰, 塑性混凝土及土工织物防渗, 最大防渗高度 69.6 m。总工程量为: 土方开挖 214 万 m³, 土石方填筑 280 万 m³, 石方开挖 667.8 万 m³, 混凝土浇筑 348 万 m³, 金属结构安装 1.82 万 t。

设计和建设单位 华东勘测设计院设计, 水口水电站工程建设公司负责建设。

(袁 玖)

shuiku

水库 (reservoir) 利用天然地形并修建水工建筑物所形成的人工湖泊。构成水库的水工建筑物有挡水建筑物(坝、闸)、进水口和泄水建筑物等, 有些

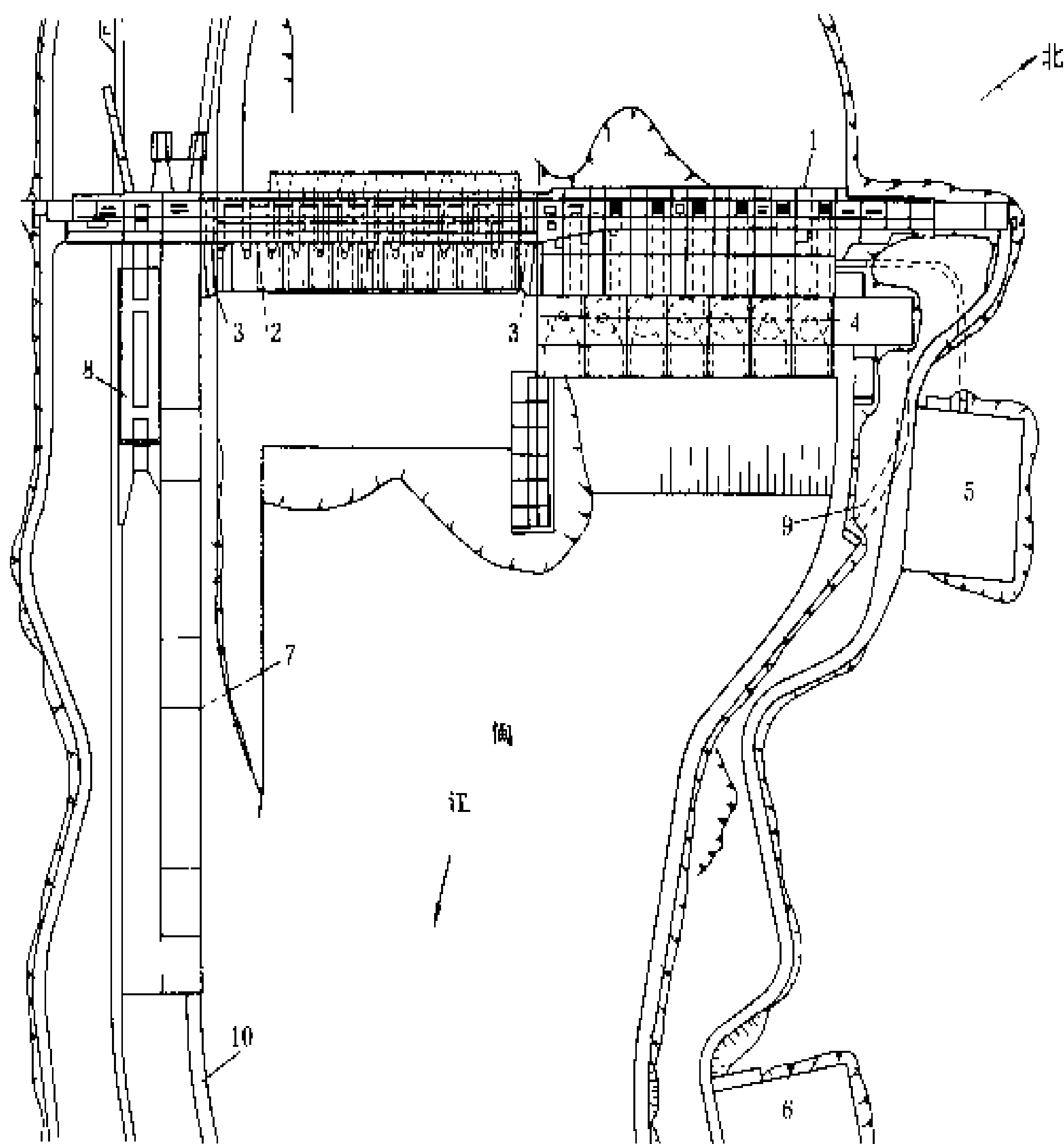
水库还设有排沙建筑物或建有保护库岸的防护建筑物等。常规水电站一般利用河谷、湖泊建库, 可形成较大库容, 如乌干达的欧文瀑布 (Owen Falls) 水电站利用维多利亚 (Victoria) 湖建库, 库容 2048 亿 m³, 是世界上库容规模最大的水电站。中国黄河上游的龙羊峡水电站的水库库容 247 亿 m³, 是中国已建成的最大水库。中国的镜泊湖水电站利用天然湖泊作水库, 库容 18.2 亿 m³; 六郎洞水电站利用地下天然溶洞修建成水库。潮汐电站的水库一般建在河口或海湾。抽水蓄能电站常利用湖泊或河谷建上、下水库 (又称上池、下池), 有时利用洼地, 通过筑坝或开挖建成水库; 这种水库的库容一般较小。

功能 水库常是水电站的重要组成部分, 其作用有: ①利用挡水建筑物壅高水位, 集中水头用以发电、增加库内航运水深或提高取水高程以扩大供水范围。②调节径流, 使天然的入库流量过程改变成能适应发电和其他用水要求的流量过程出

库。

特征水位和库容划分 水库蓄水的容积大小取决于坝的壅水高度 (水库水位) 和库区的地形条件。可利用水库地形图量度各高程的水库面积, 据此计算出各库水位时的库容并绘制库水位与库容的关系曲线, 简称库容曲线, 如图 1。

按照对水库的径流调节要求, 经径流调节计算和优化后, 可得出各种水库特征水位 (见水电站工程规



水口水电站枢纽平面布置图

1—混凝土重力坝; 2—溢流表孔; 3—泄洪底孔; 4—坝后厂房; 5—220 kV 开关站;
6—预留 500 kV 开关站位置; 7—三级连续船闸; 8—垂直升船机; 9—进厂交通洞;
10—下游导航墙

同), 总长 626 m, 可一次通过 2 艘 500 t 级驳船。2×500 t 级全平衡重、垂直卷扬式升船机, 船厢有效尺度 124 m×10.5 m×1.5 m, 最大过木 (竹) 排尺寸为 120 m×10.5 m×1.5 m (长×宽×高)。船闸和升船机, 可满足年过坝货运量 400 万 t 及木 (竹) 年过坝 250 万 m³ 的远景要求。近期货、木 (竹) 均通过船闸过坝。

工程施工 水口水电站对外交通方便, 可由公路、铁路、水运直抵现场。电站施工采用明渠导流, 分三期

划)。据此,可将水库库容划分为几个区域,如图2。死水位以下的库容称为死库容,不用于调节径流。正常蓄水位与死水位之间的库容称为有效库容,又称兴利库容或调节库容,用于为兴利(如为发电、航运、供水等)目的对径流进行调节。从汛期限制水位到校核洪水位之间的库容,

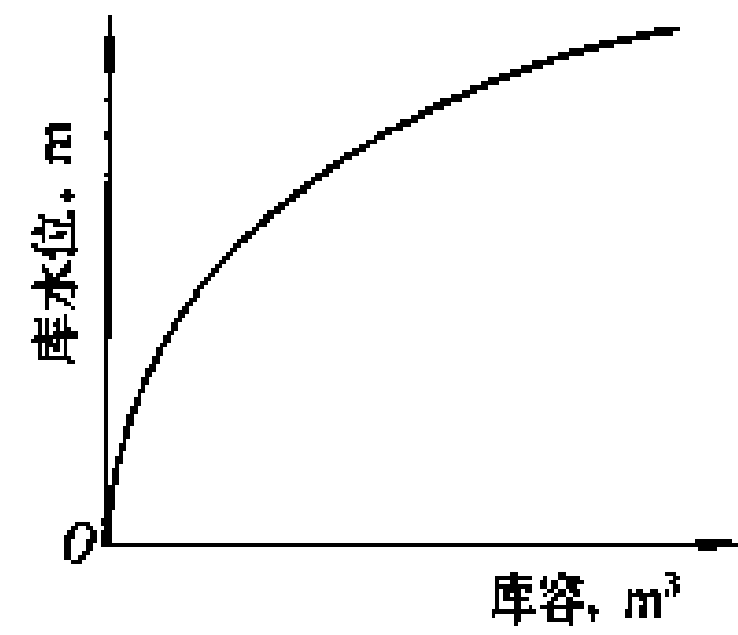


图1 水库水位与库容的关系曲线

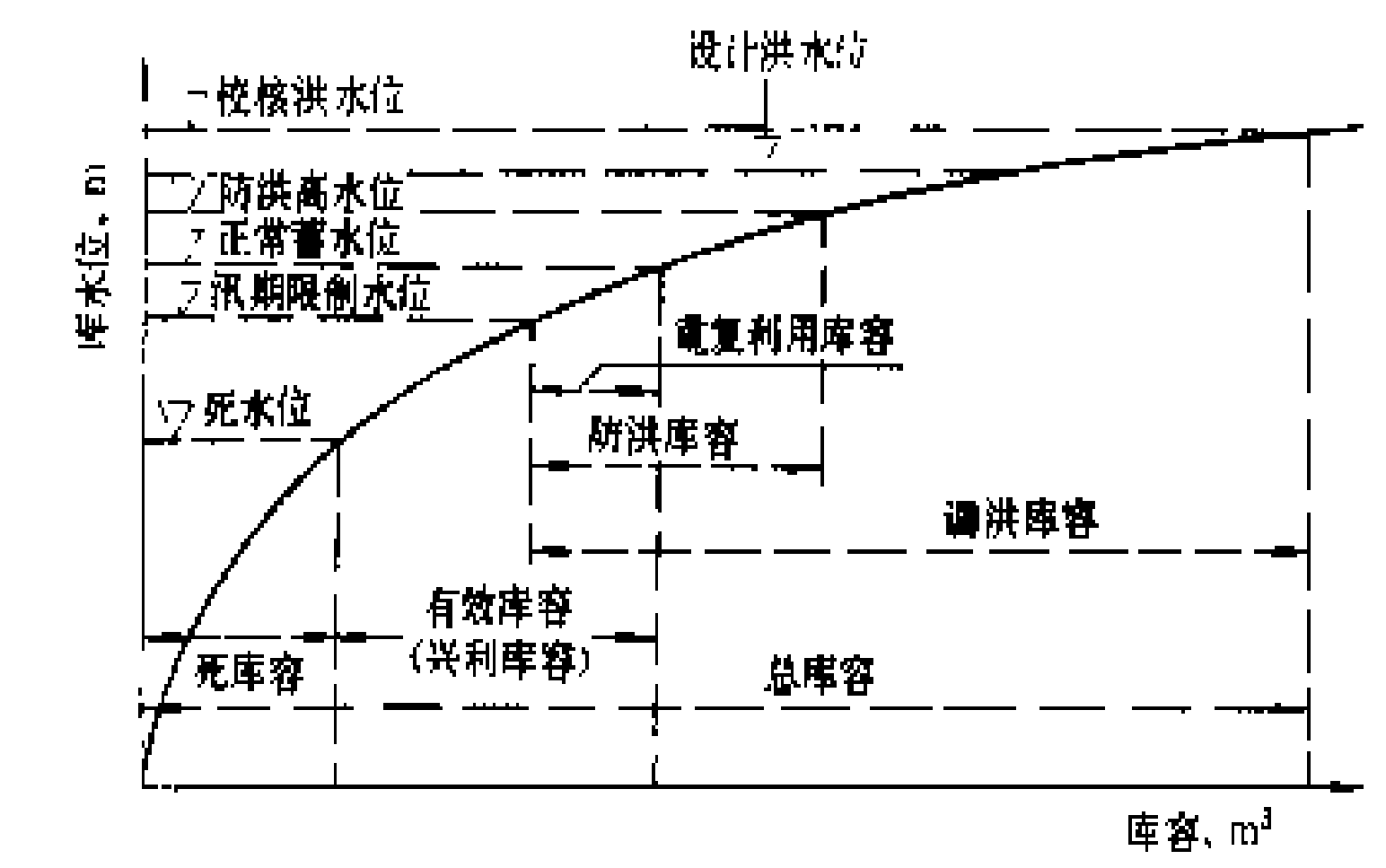


图2 库容分区图

用于调蓄洪水,称为调洪库容。调洪库容按照调洪要求又可分为两部分:从汛期限制水位到防洪高水位之间

核洪水位之间的库容,是在发生超过下游防洪标准的频率洪水时,由于水库下泄流量受泄水建筑物泄水能力的限制,为保证水库自身安全而用以蓄纳未能排出的这部分洪水量的库容。汛期限制水位一般被设置在死水位与正常蓄水位之间,从汛期限制水位至正常蓄水位之间的库容,又称为重复利用库容,在汛期用于调蓄洪水,在非汛期用于为兴利调节径流。校核洪水位以下的全部库容称为总库容。

分类 有多种分类方法,如:①按对径流的调节能力可分为多年调节、年(季)调节、周调节和日调节水库。②按总库容规模的大小分类,各国划分的标准不同。中国划分为大、中、小型3种:库容在1亿 m^3 (含1亿 m^3)以上为大型;1亿到1000万 m^3 (含1000万 m^3)为中型;1000万 m^3 以下为小型。③按库区的地形、地貌条件可分为平原水库、丘陵水库、峡谷水库等。④按水库承担的主要任务可分为发电水库、防洪水库、灌溉水库、供水水库、航运水库和综合利用水库等。

大中型水电站一般具有大型水库。表1列出了库容在500亿 m^3 以上的水库。

环境影响 水库对其附近地区直接和间接地产生有利和不利的影响。直接的有利影响主要有:提高下游防洪标准,减少下游洪涝灾害;改善区域气候,有利于生活和生产;为灌溉、航运、渔业、城乡生活和生产等、

用水提高供水的保证程度等。间接的有利影响主要有:以清洁的水电代替火电,减少火电对空气和环境的污染,又可节约宝贵的矿物燃料;并可为旅游业的发展创造条件。直接的不利影响主要有:水库淹没农田、森林、城镇,减少垦植资源和造成居民迁移;水库内水深增加、流速减小、水温改变,影响水生物的栖息和繁殖环境;引起部分地区沼泽化、诱发地震和部分库岸坍塌;恶化局部生活生产环境等。间接的不利影响主要有降低移民安置区的人均资源占有量;城镇迁建占用土地等。

在水库设计中,应对水库的环境影响进行深入的调查、研究、分析,作出预测和评价,并采取适当措施以发扬其有利影响,减轻或消除其不利影响。

妥善安置移民和赔偿水库淹没、浸没所造成的损失,不仅是经济问题,也是社会问题和政治问题,历来受到审慎对待。在设计过程中,应认真细致地查明淹

的库容,为用以减轻或避免下游洪灾而对洪水进行调蓄所需的库容,又称为防洪库容;防洪高水位以上到校

没、浸没的实物数量、需迁移的人口以及移民安置区的资源和原有居民的生活、生产条件,采用协商的方法与

表1 库容500亿 m^3 以上的水库

水电站名称	所在国家	库容(亿 m^3)	坝高(m)	建成年份
欧文瀑布 (Owen Falls)	乌干达	2048	30	1954
布拉茨克 (Брацк)	苏联	1690	125	1964
阿斯旺 (Aswan)	埃及	1620	111	1970
卡里巴 (Kariba)	津巴布韦 赞比亚	1604	128	1959
阿科松博 (Akosombo)	加纳	1480	134	1965
丹尼尔约翰逊 (Daniel Johnson)	加拿大	1419	214	1968
古里 (Guri)	委内瑞拉	1350	162	1986
克拉斯诺雅尔斯克 (Красно-Ярск)	苏联	733	124	1967
贝奈特 (WACBennett)	加拿大	703	183	1967
结雅 (Зей)	苏联	684	115	1978
卡博拉巴萨 (Cabora Bassa)	莫桑比克	630	171	1974
拉格朗德二级 (La Grande II)	加拿大	617	168	1978
拉格朗德三级 (La Grande III)	加拿大	600	93	1981
乌斯特-伊里姆 (Усть-Илимская)	苏联	594	105	1977
鲍古昌 (Богучанская)	苏联	582	87	建设中
伏尔加列宁 (Волжская Ленин)	苏联	580	45	1955
塞腊达梅萨 (Serra da Mesa)	巴西	544	144	建设中
卡涅皮斯考 (Canapiscu)	加拿大	538	56	1980



有关方面商定赔偿标准、移民安置规划方案,使人民在迁移后能拥有必要的资源和生产生活资料,迁居后能保持迁居前的生产、生活水平,并具有继续提高的前景。

水库安全 水库的运行安全至关重要,万一挡水建筑物失事,大量水体在短时间内下泄,会造成下游两岸严重洪灾,对部分地区甚至会形成毁灭性灾害。水库调度运行不当或泄水建筑物泄水能力不足,使水库超水位蓄水,也将导致大片淹没或浸没损失。为保证水库安全,应注意以下问题。

(1) 防止溃坝。库内水体如漫溢坝顶下泄,常是溃坝的主要原因之一。为此,世界各国大都制定有水库防洪标准,要求水库有足够的调洪库容、泄水建筑物有足够的泄水能力,以保证在发生稀遇的设计洪水和校核洪水情况下,也不致库水漫溢坝顶。中国制定的水库防洪标准(见洪水调节),其校核洪水的频率为万年一遇到五百年一遇,按水库库容、工程重要性和水库失事将造成的灾害程度,分别采用不同的标准。造成溃坝的另一主要原因为坝体或坝基的强度不足。为此,在坝址选择和坝基处理设计中,要进行详细的勘测和认真的研究;在施工中要精心施工,确保坝体和坝基处理的施工质量达到设计要求;在运行中要建立严密的组织和制定完善的制度,严格按设计编制并经审查批准的水库调度方案进行调度,按设计要求定期检查和观测监视坝和坝基的运行情况,并检查和维护泄水设施及其启闭设备,设置备用电源,以确保在紧急时能按调度方案运行泄水。

(2) 库岸和坝体坝基的防渗。库岸和坝体、坝基的渗漏,会降低水库效益;坝体或坝基的渗漏如超过设计允许数量,也会影响水库安全。为此,在勘测中要查明库址有否通向库外的漏水通道,如在喀斯特地区建库,尤需重视。一般要对库区进行详细的地质勘测和研究分析,作出正确的评价和结论,必要时应采取工程防渗措施。对坝体和坝基一般都设置有防渗设施,并在其下游设置排水设施,以减少渗漏量和降低坝体、坝基内的扬压力。上述的防渗和排水设施均需精心设计、精心施工,确保其能起设计要求的防渗减压作用。

(3) 库岸和上游河道岸坡的滑坡和崩塌。库岸滑坡或崩塌会引起库内涌浪。涌浪向上下游传播,将威胁水库两岸的安全。当涌浪传播至坝址处,其浪顶高程如超过了坝顶高程,将发生浪水漫溢,危及坝后厂房,也可能导致溃坝。库岸大量滑坡崩塌物堆积在水库中将减少库容,有时还会阻碍航行。库岸或水库上游一带河道岸坡的特大型滑坡、崩塌,如在水库或河道中堆积成天然坝,拦阻上游来水,持续壅高上游水位,最终会漫溢天然坝顶而导致天然坝溃决,形成溃坝洪水,也将危及

水库安全。为此,查明水库岸坡在蓄水和运行情况下,以及上游一带河道岸坡在天然情况下是否会失稳而造成滑坡崩塌的勘测研究工作,也属水库设计的必要内容。必要时应在水库工程施工的同时,对水库岸坡或上游一带河道岸坡的潜在不稳定地段,进行工程处理以消除隐患。

(4) 泥沙淤积。水流进入水库后,流速逐渐减小,水流挟沙的能力逐渐降低,泥沙将沿流程淤积在库内,使库底逐渐抬高,库容逐渐缩小。库内泥沙淤积,既影响水库的调节能力,又使库区的回水位升高,在库尾这一现象更为显著(见水库变动回水区),将危及库尾的耕地、居民点、企业和交通设施。为此,在水库设计中要专门研究泥沙淤积问题,必要时应采取减少泥沙淤积的措施,如在挡水建筑物上设置排沙设施,采用利于排沙的水库调度方式等。在计算库区回水和编制移民方案时,要同时考虑库内泥沙淤积的影响。

(马君寿)

shuiku biandong huishuiqu

水库变动回水区 (fluctuating backwater region of reservoir)

水库最高水位回水末端和最低水位回水末端之间的河段。水库变动回水区具有水库和河道的双重特性。在水库蓄水期中,变动回水区受壅水影响,水流流速降低,泥沙迅速落淤。当水库水位消落时,变动回水区自上而下逐渐脱离壅水影响,恢复天然河道状态,水流流速提高,蓄水期落淤的泥沙将被水流冲刷起动,搬运至下游深水区内。因此,在水库变动回水区内,水位变化频繁,泥沙冲淤交替,其变化幅度均远大于天然河流。

变动回水区的泥沙冲淤数量和冲淤过程主要取决于水库的运行方式。由于河流的绝大部分泥沙来自汛期,如果水库在汛期蓄水运用,大量泥沙将淤积在变动回水区内,汛期水库水位越高,淤积的泥沙量就越大。当枯水期水库因供水而水位下降时,变动回水区内会发生强烈的冲刷现象。对于沙质河床,在宽浅的过渡段,河道中将产生强烈的沙波运动,导致航道迁徙不定和水深变化无常。对于卵石河床在浅滩部位,枯水期的小流量可能难以冲走汛期搬运来的大量卵石,从而使水深不足和碍航。因此,当在航运发达的河流上修建水库时,为了减少水库消落期间的冲刷沙量,需要适当地降低汛期水库水位和抬高枯水期水位。

水库变动回水区大致可分为上段和下段两部分。变动回水区上段,水库壅水影响的持续时间较短,水位壅高值也较小,因此建库后除泥沙淤积量将较天然情况有所增多外,河流的形式不至产生重大的变化。变动回水区的下段,由于壅水作用增大,建库后往往会产生

河型的变化。通常,河流平面形态的变化趋势是分岔河道向单一河道发展,弯曲河道向微弯河道发展。在横向的形态方面,由于水位变幅增加,河道向高滩深槽发展,断面较天然情况下窄深。这些变化都有利于改善航运的条件。河型的转化会导致河流的主槽易位,当新的航槽中存在礁石等碍航因素时,需要进行一定的整治。

(张 仁)

shuiku chuqi xushui

水库初期蓄水 (reservoir initial filling)

根据近期和远景兼顾的原则,研究和制定多年调节水库从开始蓄水至正常运行阶段,水库运行和充蓄方式的原理和方法。水库初期蓄水时间的长短,主要取决于水库容积、来水量与初蓄期任务的大小。在水库初期蓄水期间,要权衡水电站供水、供电的效益,并且协调来水、供水、蓄水以及水资源综合利用各用户之间的矛盾。

水库初期蓄水的原则和研究内容 其主要内容如下。

(1)根据近期和远景兼顾的原则,选定电站在水库初期蓄水期的发电计划。水库早蓄水,可较早进入正常运行阶段,对于发挥电站的正常效益是有利的,但却相应减少了初期运行的效益;反之,虽然初期运行效益较大,却是以牺牲正常效益作代价的。故两者必须兼顾。

(2)协调水库充蓄期各综合利用用户对水资源要求的矛盾。在水库初期蓄水期间,由于库容较小,尚不能充分满足各综合利用用户对水资源的要求,存在较突出的供需矛盾,必须按综合利用效益最大的原则,制定水库初期蓄水期间水资源综合利用方案。

(3)制定水库充蓄期运行和充蓄的方式。

水库初期蓄水的制约因素 其制约因素主要有:①坝、水库及发送电工程的施工和水库清理及移民安置的进度。②根据保坝要求的水库允许最高蓄水位和充蓄的速度。③因水库蓄水可能导致的库岸塌方及水库诱发地震问题。

制定初期蓄水方案的步骤 一般按下述步骤进行。

(1)拟定可能的综合利用方案。根据施工进度计划和综合利用各用户的具体情况,拟定各种可能的综合利用方案。

(2)假定若干个初期蓄水年数。根据电力系统的情况,对各种综合利用方案,假定若干个初期蓄水的年数,派生出组合方案。

(3)选择代表年组。对拟定的各种初期蓄水的年数,统计相应年组的水量保证率曲线,从而选出有代表性的各种保证率的水量及其流量过程。有时为了简化

也可用丰、平、枯三个代表年组。

(4)进行电力电量平衡。根据各种综合利用方案、不同年组和不同保证率的流量过程,大致估计可发的出力和电量,进行逐年电力电量平衡。求得不同保证率情况下,电力系统要求水电站各年逐时段的出力和电量,作为初期蓄水计算的依据,从而可相应求得其它电站的出力和发电量。

(5)进行初期蓄水计算。对各种综合利用方案、不同年组和不同保证率的流量过程及(4)中所求得的电力系统对水电站的出力和电量的要求,进行初期蓄水计算。初期蓄水计算的边界条件是:①水库蓄水达到正常运行的年份,与原假定的蓄水年数相适应。②蓄水期电站的出力与电力电量平衡的要求相一致。③满足各综合利用方案的要求。若不能满足上述边界条件,则需根据计算结果,重新假定可发出力和电量,重新进行电力电量平衡和初期蓄水计算,直至满足边界条件为止。

(6)经济分析(见水电站经济分析)。按各组合方案不同保证率初期蓄水和电力电量平衡的结果,进行系统现值费用计算。计算期终止年份,不早于最晚进入正常运行的年份。按系统费用最小的原则,结合其它因素,选定与各综合利用方案相应的、水电站最有利的初期蓄水年数。

(7)综合利用分析和方案选择。对各综合利用方案,进行综合利用效益和费用计算和分析,结合技术和其它因素,选定合理的综合利用和水电站初期蓄水方案。

初期蓄水计算 可采用时历法或数理统计法。

(1)时历法(见时历法径流调节)。根据选定代表年组的流量过程,在满足水库运行约束和综合利用要求的前提下,按电力电量平衡的要求进行逐时段的径流调节。

(2)数理统计法(见数理统计法径流调节)。先给出年水量保证率曲线,进行径流调节,计算逐年充蓄的保证率曲线。直到各年蓄水保证率完全重合或接近重合即表示水库蓄水已趋于稳定,水库已进入正常运行。

参考书目

电力工业部成都勘测设计院主编。水能设计。北京:

电力工业出版社,1981

(许自达)

shuiku diaodutu

水库调度图 (dispatching graph of reservoir)

指导水库合理运行(即运行决策)的调度线的集合。水电站水库的运行,必须按照近期与长远兼顾的原则,合理利用流量和水头,以获得最大的发电效益。但由于水电站运行期长系列的河川径流是难以预

知的,人们不可能预先作出长期的运行决策,故在径流调节的基础上,统计出水库蓄放水规律,对一年中的各时段,求出水库状态(库容或水位)与出力的关系线,以指导水库运行。在水库运行中,人们可以根据面临时段初的水库状态,作出面临时段的出力决策,以期在保证水电站的正常运行不遭人为破坏的前提下,尽可能增加发电效益。

水库调度图的形式和特点 水库调度图以曲线组表示(也可用表格表示),如图1。

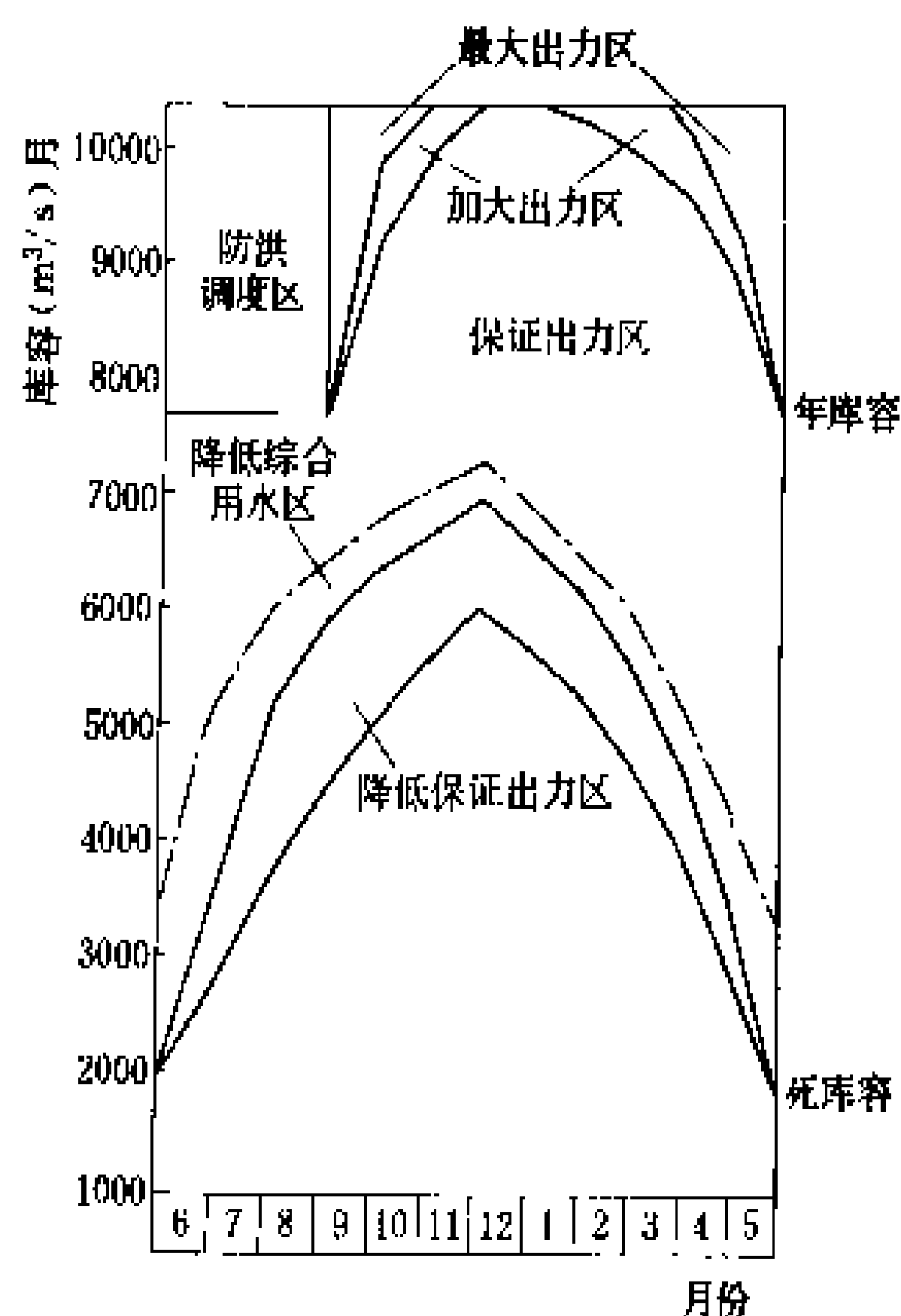


图1 水库调度图的形式

(1) 发电调度图的四个区。发电水库调度图分四个区,从下到上,分别为降低保证出力(即设计保证率以外水电站的时段最小出力)运行区、保证出力运行区、加大出力(大于保证出力)运行区和最大出力(电站满载运行)运行区。多年调节水库,保证出力区较大,其上调度线的最小库容为年库容,下调度线的最小库容为死库容。季(或年)调节水库,保证出力区较小,下调度线的最小库容亦为死库容。

(2) 综合利用水库调度图。除发电调度图的四个区外,尚有综合利用的调度区:①防洪调度区,在正常蓄水位以上,若有汛期限制水位,则放在汛期限制水位以上,该区按防洪要求进行调度,其泄流量应优先考虑由电站下泄。②城市及工业用水,其保证率高于发电,应确保,一般与发电结合。③灌溉调度区,在发电的保证出力区内划为两个区,其上区保证灌溉用水,下区按降低灌溉要求考虑。④下游航运调度区,与灌溉相似。见图1。

常规方法单库发电调度图的制作 其方法步骤如下。

(1) 初始计算。进行多年系列径流调节计算,求得

与设计保证率相应的保证出力与降低保证出力。

(2) 选水量模型。选择若干个年水量保证率接近设计保证率且年内水量分配不同的水文代表年(前一年汛期初到次年枯期末),作为计算的枯水模型。其他水量模型,方法相似。

(3) 保证出力区下调度线制作。对各枯水模型,按保证出力进行一年的径流调节。起始时段为汛期初,终止时段为次年枯期末。边界条件为从死库容起进行调节,到最后一个时段末,回到死库容,若不符边界条件,则对全年水量按某种比例进行修正,直到满足边界条件为止。对各枯水模型计算的库容过程,求下包线,即为保证出力区的下调度线。

(4) 保证出力区上调度线制作。按同样的模型,制作方法与下调度线相似。不同之处为:①起始时段为枯期初,终止时段为汛期末。②边界条件的起始和终止库容均应为正常蓄水位的库容。③其调度线为上包线。

(5) 降低保证出力下调度线制作。仿(3)的方法进行制作。与保证出力下调度线不同处为:①枯水模型应为保证率以外的特枯水年。②计算的出力应为降低保证出力。

(6) 加大出力区调度线制作。从保证出力到装机容量,可设定若干个加大出力值,并选与之相应的水量模型,与(3)所述方法相似,按加大出力值,进行一年的径流调节计算,其边界条件为从年库容到年库容。各种加大出力线组成加大出力区。

(7) 调度图的检验与修正。调度图制成后,按调度图进行长系列的径流调节计算,并统计计算结果的保

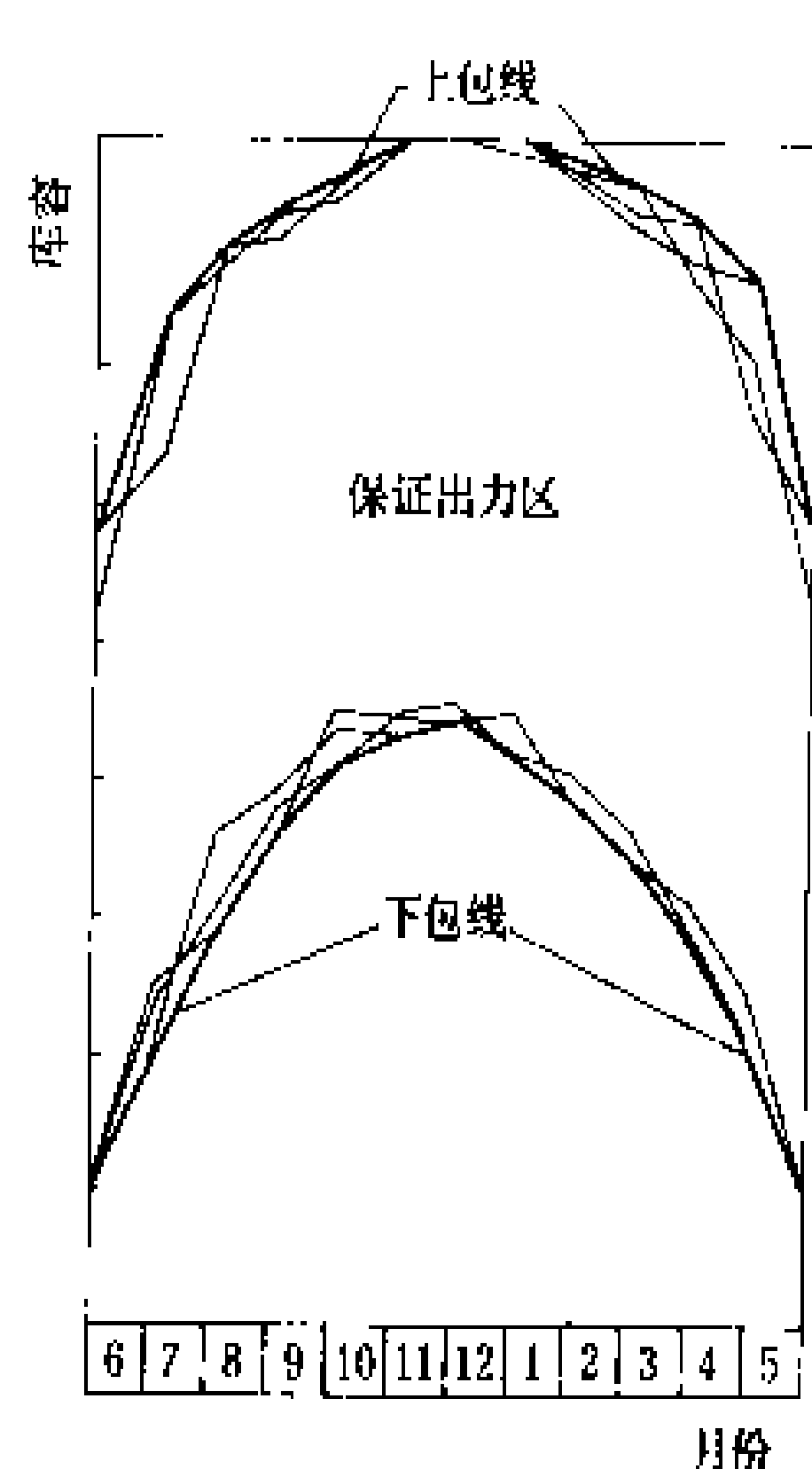


图2 水库调度图的制作示意

证率是否与设计保证率一致。若一致,则调度图即为所求;若保证率偏小,则应减少保证出力,重新制作新调度图;若保证率偏大,则应加大保证出力,重新制作新调度图。这是一个迭代过程,可用变步长搜索法搜索区间,并用弦截法收敛。

水库调度图的制作示意图2。

其他形式的水库调度图 包括预报调度图、优化

调度图、库群调度图等。

(1)预报调度图。调度图的形式与无预报的调度图略有不同,出力决策的信息,除水库状态外,还应增加面临时段的水量,即其纵坐标应为面临时段的库容加预报的水量。

(2)优化调度图。多为随机型,多按随机动态规划方法制作。(见水电站水库优化调度)

(3)库群调度图。状态变量为库群的水库蓄能,决策变量为水电站群的出力。可由水库群优化补偿调节计算的结果进行统计而得。

(朱藻文 伍宏中)

shuiku gongcheng dizhi kancha

水库工程地质勘察 (engineering geological investigation for reservoir) 论证水库蓄水引起的各种工程地质问题所进行的综合调查工作。主要调查水库渗漏、水库浸没及库岸稳定性等问题,不同的勘察阶段其任务、内容及方法等都有相应的要求。

水库工程地质勘察任务 ①规划勘察。主要是了解各梯级库区基本地质条件和主要工程地质问题,分析建库的可能性。②可行性研究勘察。调查水库区的主要工程地质问题并作出初步评价。③初步设计勘察。查明水库区专门性水文地质、工程地质问题和预测蓄水后的变化。④技术设计及施工图设计勘察。对库区问题补充论证,提出防护处理和长期观测的建议。

水库工程地质勘察内容 ①水库渗漏。库水向低的邻谷或向坝下游漏失的现象。严重的渗漏直接影响发电与供水效益,还可能引起邻谷或坝下游地区的浸没和边坡塌滑等环境地质问题。勘察时主要查明邻谷、洼地和溶蚀洼地是否低于库水位;水库与邻谷间单薄分水岭或坝下游河湾地段的透水性及地下分水岭位置或地下水位高程;水库周边强透水岩层、大断层破碎带和古河道分布;可溶岩区喀斯特发育程度,暗河、溶蚀裂隙带及相对隔水及位置;库岸地下水的补排关系和动态。②水库浸没。水库蓄水使水库周边地区地下水位壅高而造成的各种灾害现象,包括土壤盐渍化和沼泽化,建筑物地基沉陷或破坏,矿井充水或涌水量增大等。勘察时主要调查可能浸没区的地貌、水文地质结构、土的分层、地下水位以及土的物理与水理性质、毛管水最大上升高度和发生浸没的地下水临界深度等。③库岸稳定问题。水库蓄水改变河谷岸坡的自然平衡条件而引起库岸的破坏。其破坏形式有库岸塌滑及水库坍岸两种类型。库岸塌滑是库岸岩(土)体发生崩塌与滑坡的现象,规模大的塌滑激起涌浪,直接危及大坝的安全。勘察时主要调查各类滑坡、崩塌体及潜在不稳

定岩体的分布范围和体积;水库坍岸是岸坡土体在库水及波浪的作用下,不断发生坍落破坏的现象。中国三门峡、盐锅峡、官厅等水库均发生有不同程度的坍岸。如三门峡水库在蓄水两年过程中,最大坍岸宽达280m。勘察时主要调查土的分层、级配和物理力学性质,岸坡的自然稳定坡角,浪击带稳定坡角和水下浅滩坡角等。④固体径流来源主要是库区岸坡及支沟两侧的松散堆积物、土层及强烈风化破碎岩体。调查内容为上述岩土体的分布、数量、岸边坡度及植被情况等。⑤水库诱发地震。水库蓄水诱发的地震。调查内容为水库区的区域构造背景、活断层的分布和活动时间,地震活动性及基本烈度,库区岩层的蓄能条件;可溶岩的分布和喀斯特发育情况等。分析水库地震的性质、震中位置和震级大小。

水库工程地质勘察方法 ①规划阶段。可结合区域地质调查进行,在了解一般水文地质及工程地质条件的基础上,初步分析评价水库地质问题。如存在重大工程地质问题,则需进行专门的库区工程地质测绘,有重点的布置少量勘探工作。②可行性研究阶段,在可能渗漏、浸没、不稳定岸坡等区段进行专门性工程地质勘察,在地质测绘基础上进行勘探、试验和必要的监测工作,初步查明和评价水库区的工程地质条件及存在的问题。③初步设计阶段。在已确定存在工程地质问题的区段,进行大比例尺专门地质测绘,并综合使用勘探、试验及监测等各种方法,查明和评价这些问题。④技术设计施工图设计阶段。主要以工程地质监测、补充勘探,对重大疑难问题进行专题研究。

水库工程地质勘察成果 水库工程地质勘察的成果一般都编入各阶段的工程地质勘察报告,需要时也可单独出专题报告。工程地质勘察报告包括有关附图和附件。各勘察阶段成果的内容和深度各不相同。

(崔诗礼)

shuiku huishui

水库回水 (backwater of reservoir) 河道修建闸坝形成水库后库区水位壅高的现象。其纵剖面线称回水线。水库回水影响范围与坝前水位高低及入库流量大小有关。当入库流量固定时,坝前水位愈高回水影响愈远;当坝前水位不变时,入库流量愈大回水影响愈近。

水库回水改变了库区自然环境和社会环境。局部地区气候变化有利于库周农业和林业发展;水位抬高有利于库边灌溉及城市供水;水域扩大、流速减缓可改善航运,并为发展养鱼和旅游业创造条件。水库回水也淹没一些农田、森林、房屋、厂矿、道路、通信设施及文物古迹,需要迁移居民,另外造成泥沙淤积及回水末

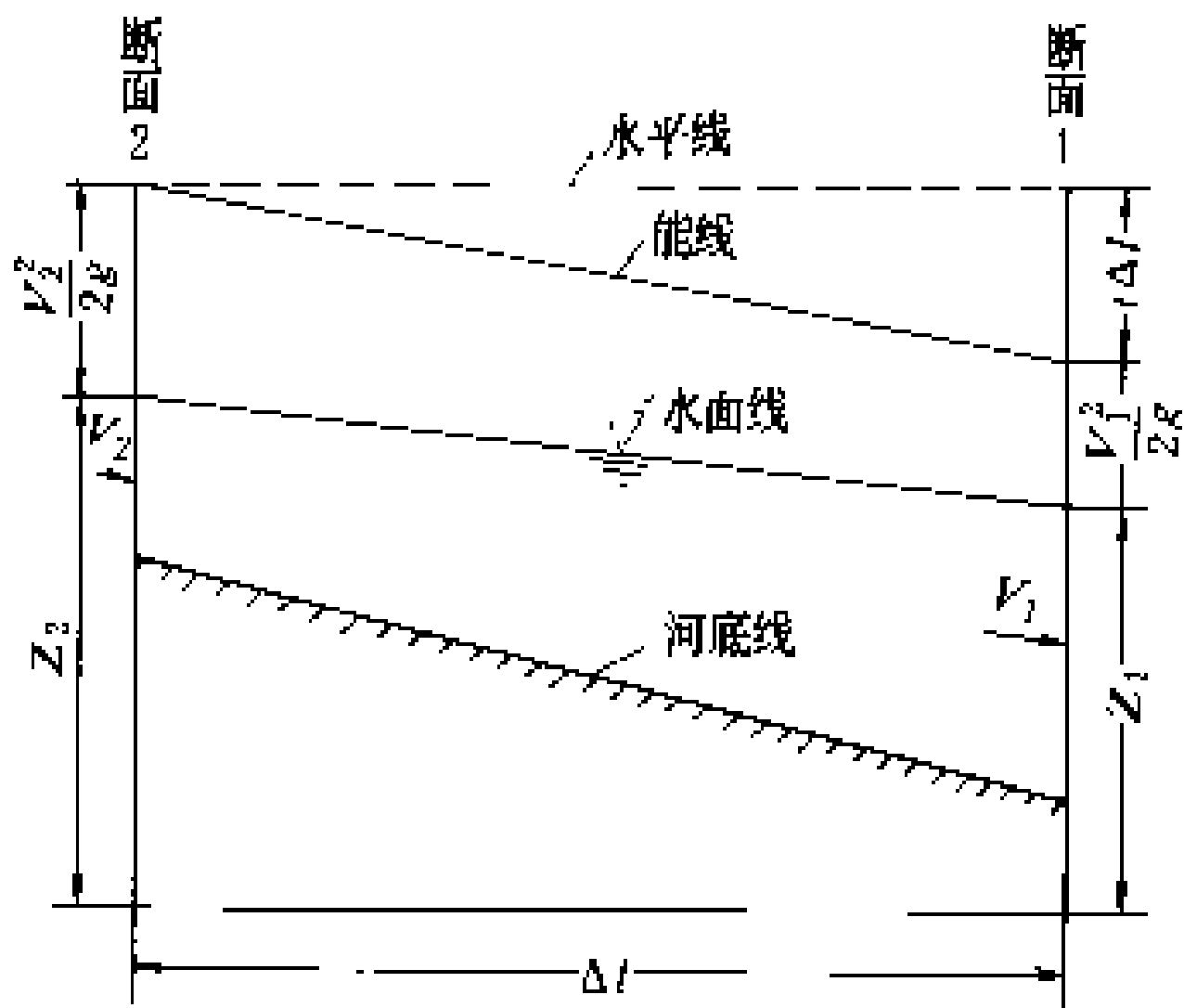


端淤积上延。为估算水库淹没损失,预测回水对泥沙淤积和环境的影响,选定经济合理的工程规模,需要计算水库回水线。

水库坝前水位及入库流量年内不断变化,各时期回水线也不同,水库回水线是不恒定流问题,可用圣维南方程组计算不同时间的回水线。工程设计中需推求某标准洪水最高回水线或某标准枯水最低回水线,计算一般按恒定流能量方程(伯努利方程)分河段进行计算

$$Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} = Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + i\Delta l \tag{1}$$

式中 Z_1, Z_2 及 V_1, V_2 分别为断面 1 及断面 2 的水位和流速(见图); i 为河段摩阻比降; Δl 为河段长度; $i\Delta l$ 表示沿程阻力的水头损失; g 为重力加速度。当河段突然扩大或收缩时,式(1)中需增加局部损失项。



明渠水流能量平衡图

回水计算是已知河段流量 Q 、下游(断面 1)的水位 Z_1 及流速 V_1 ,由式(1)逐段向上游推算。计算方法分试算法与图解法。试算法适用了计算机计算。图解法可分艾斯科福(Escoffer)法、控制曲线法(或称 H. M. 贝尔纳斯基法)及埃兹阿(Ezra)法。

计算所需基本资料有:①库区实测纵横断面资料或水库地形图;②库区河道糙率资料;③坝址及入库设计洪水成果;④水库调洪计算成果;⑤水库泥沙淤积计算成果。

工程设计需推求某标准洪水最高回水线,应计算许多组不同坝前水位与相应入库流量的回水线取其外包线。通常是计算某标准洪水(通过水库调节后)的最高水位与相应入库流量、入库最大流量相应坝前水位及正常蓄水位相应入库流量 3 条回水线,取其外包线作为淹没或移民的设计回水线。

河道天然水面线是水库回水线的渐近线,两者相交于无穷远,工程设计中为确定回水末端,中国现行规范 SD130-84 规定两者相差 0.1~0.3 m 处作为回水末端。

水库回水是造成泥沙淤积的主要原因,而泥沙淤积又使回水线抬高,两者互相影响,但总的趋势是不断衰减,最终达到新的平衡。

参考书目

电力工业部成都勘测设计院. 水能设计. 北京: 电力工业出版社, 1981

(唐友一)

shuikuqun buchang jingliu tiaojie

水库群补偿径流调节 (compensating runoff regulation of reservoirs group)

同一电力系统中,水电站间以出力或(和)流量相互补充,从而增加水电站群发电效益的径流调节方式。在同--电力系统中,水电站群是以同一时间各水电站出力之和来满足电力系统需求的。若按各电站单独发电效益最大准则来进行径流调节,水电站群的总发电效益并不是最大的,必须以水电站群的总发电效益为最大,来进行水库群补偿径流调节,据以制定每个电站的运行方式。水库群补偿径流调节,在径流随机过程的描述方面碰到了时、空多维概型的困难问题,故目前多采用时历法径流调节。

类型 按水电站间是否有水力联系,水库群补偿径流调节分为跨流域电力补偿径流调节和梯级流量补偿径流调节两类。在复杂的水电站群中,这两种补偿调节可能同时存在。

(1)跨流域电力补偿径流调节 用于有电力联系的水电站群。在同--电力系统中不同河流的水电站,若水文特性不同(如丰、枯期出现的季节或程度不同),电站间的出力有自然补偿的作用,叫“水文补偿”。跨流域电力补偿径流调节,是利用调节性能较好的水电站(补偿电站)水库对调节性能较差的水电站(被补偿电站)进行补偿调节。当被补偿电站来水多、因而多发电时,使补偿电站少发电,将水蓄起来。在被补偿电站来水不足而少发电时,用这些存水加大补偿电站的出力,从而增加水电站的总保证出力,叫“库容补偿”。若有两条河流的梯级电站水库群具有不同的调节性能,则可以用调节性能好的河流梯级电站对调节性能比较差的梯级电站进行补偿调节。跨流域电力补偿调节水电站群综合保证出力的增加,是以减少总年发电量为代价的,但付出这种代价是值得的。

(2)梯级流量补偿径流调节(简称“梯级补偿调节”),用于水力上有联系的水电站群。这类水电站群水文特性相似,一般不存在水文补偿效益,主要是研究梯级电站水库的蓄、放水策略。即,当下游水电站区间来水流量小时,上游水电站的水库多放水,当下游水电站区间来水流量大时,上游水库少放水,从而增加梯级电



站群的总保证出力或发电量。由于上游水库的放水流量经过下游各梯级发电,故其补偿效益非常显著。当上游电站的尾水位与下游电站的库水位重叠时,进行梯级补偿调节应计及因水位重叠而损失的水头。

特点 在同一电力系统中或同一条河上有水力联系的水电站群,每一座水电站水库运行方式的改变,必然影响其他水电站水库的运行方式。水库群补偿径流调节,必须以水电站群总发电效益最大为出发点,进行运行决策,制定水电站水库群的补偿调节方式和各自的运行方式。为了取得水电站群最大的发电效益,被补偿电站和补偿电站的运行方式常有较大的差异,有时是完全相反的。以水电站群总体效益最优进行径流调节,必然偏离单库的最优,但却增加了群体的效益。按水电站群最优进行径流调节所得的各水电站的保证出力,常较各自按单库最优调节所得的保证出力为小,但水电站群综合保证出力(按各电站同时出力相加而得的水电站群最小出力)却比按单库调节而得的结果为大。在这种情况下,单库保证出力的意义相对较小。在梯级水库群中,由于上游水库单位库容的蓄能较大(所控制的水头大),而下游水库单位水头蕴藏的能量较大(所利用的流量大),故较频繁地利用上游水库进行调节,而让下游水库较多的时间保持高水位,往往是有利的。

与单库径流调节相比,库群径流补偿调节需增加一些约束条件,如跨流域电力补偿的输电能力约束、电站最小出力约束等。

计算方法 有电当量法、逐水库补偿法、判别式法和优化法四种。

(1)电当量法。是一种较粗略的方法,可估计出补偿调节的周期。先按单库的情况,进行被补偿电站的径流调节,求得其出力过程和总能量。再计算补偿电站在补偿周期中的总能量。将两类电站的总能量相加,除以调节时段的长度,即得补偿调节后两类电站的均匀的总出力过程。再逐时段地,将两类电站的总出力过程,减去相应被补偿电站的出力过程,即得补偿电站的出力过程。本法较简易,可得到近似的结果。

(2)逐水库补偿法。先对有调节能力的水库,按其调节能力,由小到大进行排队。先对调节能力最小的水库,进行单库调节计算求得其出力过程。然后对其他水库,按调节能力从小到大次序,逐次加入一个电站,对已求得之电站(群)总出力进行补偿调节。其方法是在满足各种约束条件的前提下,使综合的最小出力极大化,可用迭代法求解,迭代初值可用电当量法求得。当

最后一个补偿电站调节完后,即得最后结果。该法近似地模拟了逐座水电站的运行,精度高于电当量法。

(3)判别式法。按水电站供水而引起的不蓄电能损失最小(或蓄水而引起的不蓄电能增加最大)的原则,确定水电站水库群运行的蓄放水次序的判别式,进行各电站出力的分配。在电站1和电站2共同担负系统负荷而需要供水时,下列条件成立,应由电站1供水,反之应由电站2供水,即

$$(F_1 \times H_1) / (F_2 \times H_2) < W_1 / W_2$$

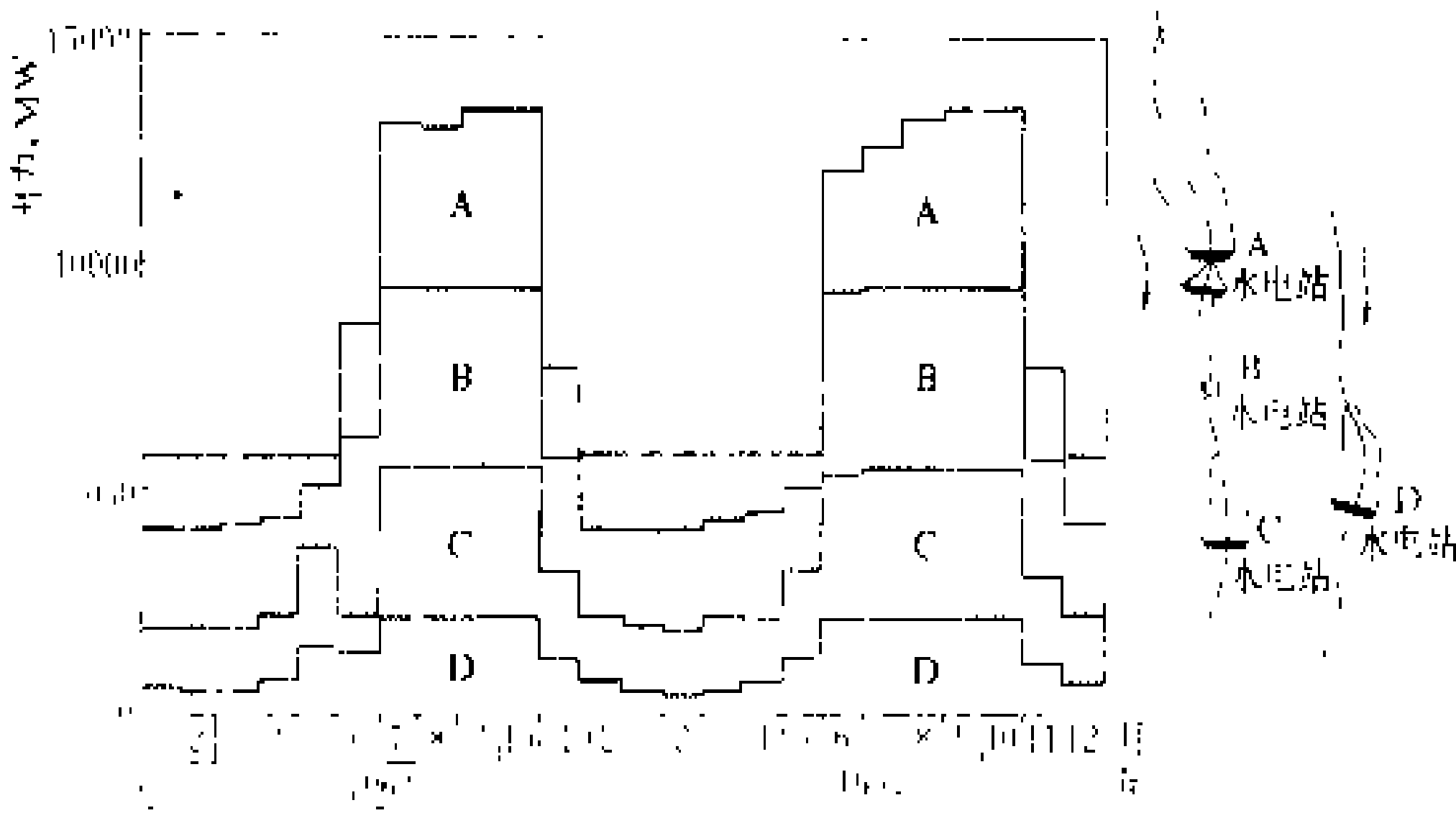
式中 F_1 、 F_2 分别为电站1和电站2面临时段水库面积; H_1 、 H_2 分别为电站1和电站2面临时段水头(含其下游各梯级电站的水头); W_1 、 W_2 分别为电站1和电站2面临时段水量。

若水电站多于2座,则应用上述原则,进行供水次序排队,按次序供水。当电站需蓄水时,则把判别式反过来应用。

该法从减少不蓄电能损失的角度,部分地解决了水库群的优化运行问题,优于逐水库补偿法。但是,该法尚存在一些问题:①未考虑过分地抬高库水位,可能引起后期不应发生的弃水而造成的能量损失。②上游水库常产生枯期过早放空,从而使其枯期出力过小。

(4)优化法。用数学规划的方法,在一个模型中统一优化水库群的运行方式。常用的模型有非线性规划、线性规划和动态规划模型。(见 水能利用优化)

水库群补偿径流调节成果如图所示。



水库群补偿径流调节成果示意图

(朱藻文)

shuiku shuiwen nisha guance

水库水文泥沙观测 (hydrometry of reservoir)

系统地观测和收集水库水文、泥沙资料的工作。目的是探索水、沙运动规律,为保证工程安全、搞好运用管理、发挥工程效益、改进工程设计和科学研究提供基本资料。为适应不同的目的和任务,观测项目可概括为3类。①基本观测项目。为工程安全、运用管

shuǐ 水

理和还原计算所必需,在每个水库水文站都要进行长期观测的项目。②专用观测项目。根据水库情况和实际需要而观测的项目。③实验研究项目。为某项科学实验专题而开展的观测项目。有这类任务的站,一般设为水库实验站并有专门实验研究大纲。

中国 1953 年开始对官厅水库进行观测研究,其后在黄河三门峡、刘家峡、盐锅峡、青铜峡,汉江丹江口,大渡河龚嘴等大型水利水电工程进行了观测研究,取得许多宝贵资料,为中国水库泥沙设计和研究工作奠定了基础。三门峡水库的观测研究对工程改建提供了依据。现在全国大中型水库开展了基本观测项目的有 276 座,已列入基本水文站网,有 20 座重点水库开展了实验研究工作。国外,水库水文泥沙观测工作也普遍受到重视,苏联对所有大型水库都设置了观测站网。美国自 20 世纪 30 年代起,每 5 年对全国所有水库淤积量进行一次测量并刊布成果。

基本观测项目 包括坝前水位、出库水沙量、水库淤积量及其分布。根据库区情况和测验条件,采用断面法和地形法,对比前后两次测验结果,可求得淤积量,本次测验结果还可计算和绘制水库的水位-容积曲线。

专用观测项目 有 4 项:①进库水沙量,根据实际需要和河流条件设立进库站;②水质监测,为水库的化学物质平衡和蓄水量的水质评价提供依据;③冰情观测,对有冰塞冰坝现象且影响水库或其上下游安全的水库进行观测;④水文调查,为弥补经常观测资料的不足而进行的调查。

实验研究项目 为更好地了解水库水流泥沙运动规律以便为提高经济效益、进行工程改建和改进规划设计工作提供依据。中国在下列一些项目取得一定成果:①变动回水区水沙观测;②异重流测验,包括异重流形成条件、持续运动条件、排沙效率等;③坝区水文泥沙观测;④库区洪水演进观测,在水库沿程观测流量和水位变化情况。

(庄德楨)

shuiku xiayou hedao chongshua

水库下游河道冲刷 (river degradation at downstream of reservoir) 水库下泄较清的水流引起下游河道冲刷的过程。在冲积河流上修建水利水电枢纽后,由于水库拦沙,使出库水流含沙量大为降低,破坏了枢纽下游河床的输沙平衡状态,造成枢纽下游河床的再调整,主要表现为冲刷过程。冲刷达到一定程度,使河床粗化、河道比降和流速减小,降低了水流的挟沙能力,从而限制了冲刷的发展,使河道逐步达到新的平衡状态。

河道冲刷的类型有两种:①在下游较长河段发生

的普遍冲刷;②在枢纽下游较短河段内发生的局部冲刷。河床普遍冲刷范围可以向下游延伸很远的距离。例如,中国黄河三门峡水库下泄清水期间,冲刷发展到整个下游河道,全长近 800 km。河床的普遍冲刷使河床高程降低,因基础受到淘刷,可能危及堤岸工程的安全,对防汛不利。河道普遍冲刷会使河道展宽,滩地坍塌,造成耕地的损失。枢纽下游的局部冲刷,将直接危及枢纽本身的安全。

河道冲刷过程 床沙组成通常是不均匀的,河道冲刷的结果一般会引起床沙的粗化。对于卵石夹沙河段,水流冲刷使细颗粒被带走,留下的粗颗粒就会形成抗冲刷铺盖层,阻止河床下切,因此河道冲刷造成的比降变缓一般并不明显。对于细沙组成的河段,由于各级沙粒都能被水流起动,不易形成抗冲铺盖层,但同样存在着粗化现象,使河床糙率有较大幅度的增加。床沙组成变粗、糙率增大和比降调平都使水流挟沙能力降低,因此也能遏制河床冲刷。

河道冲刷计算 在实际工程中常需对枢纽下游冲刷的规模和位置作出定量的估计,以便确定治理措施,故常需进行河道冲刷计算。枢纽下游河床的普遍冲刷计算可分为冲刷过程计算和冲刷平衡状态计算两种,前者是对冲刷过程比较详细的计算,计算工作量大而繁复;后者则较简单,工作量小。计算方法通常需根据设计的要求和河床变形的性质选定。进行河道冲刷计算所用的基本公式与计算水库淤积的基本方程式相同。在实际工作中常遇到的是,对在清水冲刷下河道终极平衡状态的估算。由于河床组成物质的不同,清水冲刷的过程也有差别,当床沙组成中有足够的粗颗粒时,河床下切将终止于抗冲铺盖层的形成。当下游床沙中粗颗粒很少(小于 10%)时,河床的下切将终止于平衡比降。按照上述两种终止河床冲刷的类型,目前也相应有两种估算河床冲刷达到终极平衡状态的方法。由于局部冲刷和普遍冲刷的成因不同,计算方法也不一样。目前多根据试验及实测资料分析求得的经验公式估算。最终确定冲刷坑尺寸仍需进行动床模型试验。

参考书目

钱宁,张仁,周志德.河床演变学.北京:科学出版社,1987

(姜乃森)

shuiku yanmo chuli

水库淹没处理 (treatment of reservoir inundation) 对受到水库淹没及影响的土地、居民点、城镇、各种设施及经济对象,进行调查和处理的工作。

水库淹没处理是水电工程规划设计和建设中需解决的重要问题。河流规划开发方式、枢纽坝址选择和水库正常蓄水位方案选定等,均需考虑淹没所及的范围,淹没对象的重要性和淹地、移民的规模,淹没对区域经济的影响,淹没处理的技术可行性、经济合理性以及移民安置的可靠措施等。

水库淹没规模与性质 淹没损失的大小取决于枢纽工程筑坝的高低、水库面积与容积的大小,库区的河谷地貌形态,自然资源,社会资源和地区经济开发的状况。淹没损失的性质需视受淹的不同经济对象以及所处库区不同的部位而有区别,可归纳为以下三类。①就损失时间而言,可分为永久性和临时性的损失。②就损失程度而言,有的可迁移或保护,有的不可迁移和保护,后者则完全失去本身的使用价值。③就所在的空间而言,有直接的和间接的损失。所以在淹没处理设计中须分别上述不同情况,针对不 同淹没对象采取不同的处理措施。

水库淹没处理范围 按不同程度的淹没影响性质,一般可划分为:①经常淹没区;②临时淹没区;③浸没区;④塌岸、滑坡地段;⑤库周影响地区和⑥岩溶影响地区。

(1) 经常淹没区。一般指正常蓄水位以下,受库水位持续或反复淹没的地区,但多年调节水库的正常蓄水位不一定每年都能达到。

(2) 临时淹没区。为正常蓄水位以上受水库洪水壅高的沿程回水以及风浪爬高、冰塞壅水淹没的地区。中国水利电力部 1984 年颁发的 SD130-84《水利水电工程水库淹没处理设计规范》规定的淹没处理设计洪水标准如表所列。

不同淹没对象设计洪水标准表

淹没经济对象	洪水标准 (频率%)	重现期 (年)
耕地、园地	50~20	2~5
林地	正常蓄水位	
农村居民点、一般城镇和一般工矿区	10~5	10~20
中等城市、中等工矿区	5~2	20~50
重要城市、重要工矿区	2~1	50~100

注:1. 专项设施的淹没洪水标准,由专业规范确定。
2. 对多沙河流的回水淹没,尚需考虑泥沙淤积的影响。

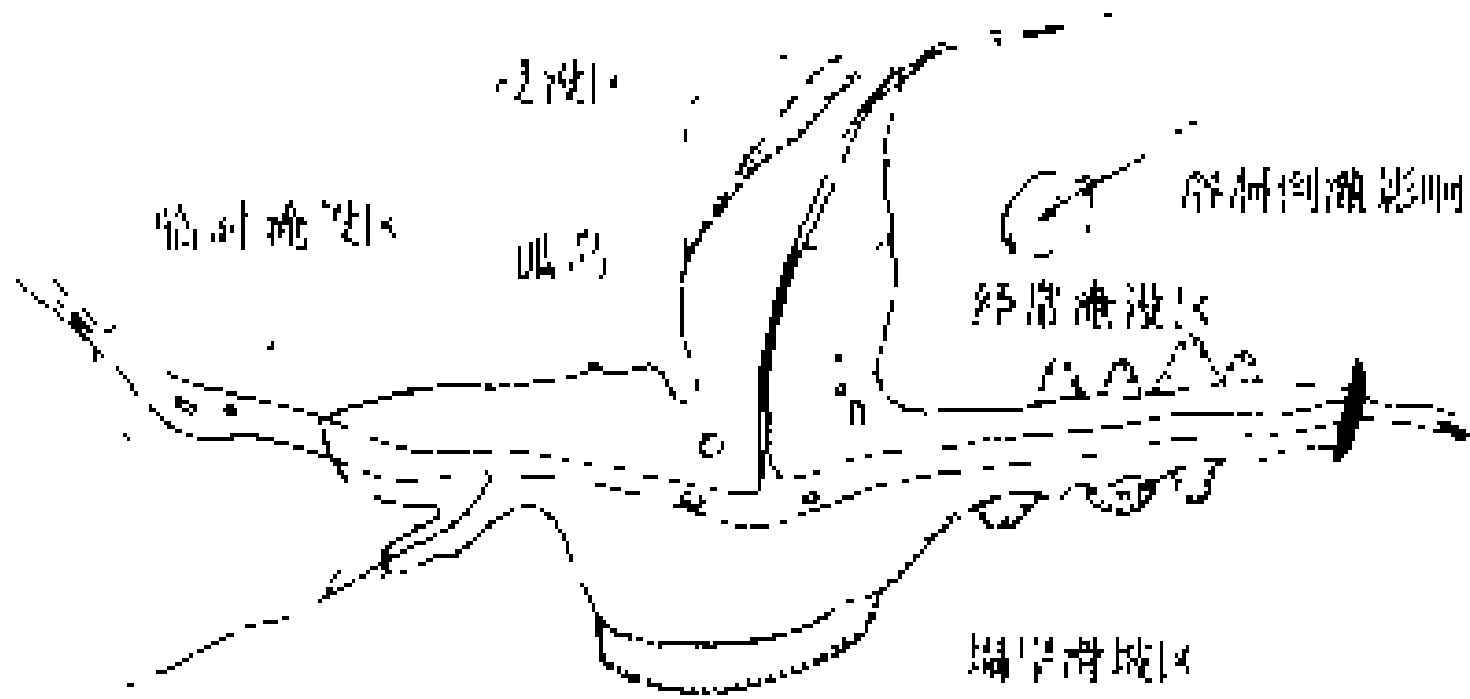
(3) 浸没区。因水库蓄水后,在一定的地质条件下,地下水发生根本变化,引起库周局部地区的地下水位升高所致,严重者会发生土地沼泽化和次生盐碱化。

(4) 塌岸、滑坡地段:由于水库形成后,库岸受风

浪冲击,水流侵蚀,使岩石、土壤风化速度加快,抗剪强度减弱及库水位涨落引起库岸地下水动水压力变化而产生库岸再造的地段,列为迁移对象的标准,一般为预测 5~10 年内可能达到的范围。

(5) 库周影响地区。水库蓄水后失去生产、生活条件而必须采取措施的库边或孤岛上的居民点。

(6) 岩溶影响地区。在岩溶地貌发育的石灰岩地区,流入水库区的暗河出口,因受库水位顶托或泥沙淤堵,致使库边或邻谷暗河入口处(漏斗、落水洞)的地面水排泄不畅或断绝排水出路而加重内涝;当地面高程低于库水位的地方,将受倒灌淹没;库区若有贯穿性溶洞会产生库漏淹没。水库淹没处理范围如下图所示。



水库淹没影响区示意图

水库区淹没损失的规模及其特征,一般以水库淹没实物指标来表示,它是水库淹没处理设计的基本依据,也是工程设计中的一个技术经济特性指标。

处理措施 为在新的环境内安置移民,重建家园,迁建城镇、专业单位和恢复各种基础设施。包括移民安置和专项迁建。

(1) 移民安置。是一项复杂和政策性强的社会建设系统工程,是与水电站工程建设同样重要和必须同步完成的水库移民工程。要在安置区通过改造自然,开发利用当地资源,协调社会环境,调整产业结构,并运用先进的科学技术成果组织和经营管理,改善与发展生态系统和社会经济的双重良性循环,使移民得到妥善安置,地区经济得到恢复和逐步繁荣。

(2) 专项迁建。是要将被水库淹没的专项设施合理迁建,以能恢复原有功能和效益。

结合移民安置,并为扩展工程效益,常开展库区综合开发。并根据工程运行,环保和库区综合开发等不同要求,在水库蓄水前做好库底清理和在库水位以下相应的设施。

发展与展望 水库淹没涉及资源、物种和环境的保护,是水电建设的一大制约因素,其中筑坝建库导致非自愿移民是经常遇到的敏感和复杂的问题,已引起各国政府和世界组织的重视。中华人民共和国建国以来,过去长期对移民采用安置、一次补偿的办法,近年来开始试行开发性移民政策,对移民安置采取前期补



偿、补助与后期生产扶持相结合的办法,从工程效益中提取库区移民建设基金,并制订一系列的移民优惠政策,以帮助移民改善生产及生活条件。世界银行自 80 年代以来也进一步强调做好移民工作,对资助项目中的非自愿移民的补偿和安置所规定的原则是:必须保证移民至少获得他们以前的生活标准,移民方案必须同时是开发方案,旨在体现移民生产基地的建设方式,以提供足够的机会和资源,使移民作为自我承受的生产者。并强调切实做好安置区的规划设计、保证投资筹措及重视技术培训、监测监理工作等。从目前的发展趋势看,国际上对库区移民的安置也已经开始从一次赔偿性安置向长期开发性安置过渡。

(张根林)

shuiku yanmo shiwu zhibiao

水库淹没实物指标 (material indexes of reservoir inundation) 水库淹没处理范围内的人口、土地、农村、城镇、专项设施等各种经济对象数量的统称。它表示水库淹没损失的规模和特征;是研究水资源开发利用,论证工程规模的重要技术经济指标之一;是研究评估水库淹没对地区国民经济影响、生态环境影响及淹没处理的基本依据。指标的取得必须进行现场调查。

实物指标调查项目 包括农村、城镇居民点,农业人口和非农业人口,各类房屋(混合、砖木、土木、木结构、各种窑洞房、杂房等)及各类附属建筑物;各类土地,包括耕地(水田、水浇地、商品菜地、旱地)、轮歇地、河滩地、宅基地、园地(果园、茶园、参园等)、林地(用材林、薪炭林、灌木林、各种经济林等)、牧地(天然草地、改良草地、人工草地);铁路、公路、其他道路,工业企业,航运设施,水利工程,输变电工程,电信与广播线路,工业管道,军事设施,文物古迹,矿藏,景点或风景区等。实物指标中的各项淹没经济对象,其绝大多数皆为动态指标,因受自然发展规律的支配和人类社会的作用,随着时间的推移而有所变化。因此各个设计阶段均须进行调查,并预测其净增量,汇入实物指标中,以保持实物指标的合理性、可靠性。

调查范围 在中国,首先需依照设计规范确定水库淹没处理范围。当工程特征值尚未选定之前,往往有两个以上的正常蓄水位方案,调查范围宜以最低和最高方案为控制,而又侧重于设计某个倾向方案。在规划阶段可采用比例尺 1:10000~1:25000 的地形图,在现场持图寻找地貌特征和地物标志确定水位高程的实地界线,进行填图,同时辅以重点测量。在可行性研究及初步设计阶段,需作测量放线,以测设临时界桩插旗显示实地的调查范围。

调查基本要求 可行性研究阶段全面调查农村居民点、人口、土地、房屋、乡村、企业、城镇及专项设施,其他项目一般可作典型调查。初步设计阶段,全面调查所有淹没经济对象。技施设计阶段,设计单位一般不再调查,但如果由于初设至技施时间相距较长,或设计条件有变更,地方政府或专项管理部门对初设的淹没实物指标成果提出异议时,可作局部或全部调查核实。

调查分类 按社会经济结构可分为农村、城镇、专项三个部分。农村包括从事农业为主的村、组、农户和分散在农村的国营农、林、渔、牧场等单位,以及城镇所辖的郊区农村;城镇包括已建制的市或镇、以及区、乡驻地的小集镇;专项设施为受各专业部门管辖的国有企业、基础设施工程及其他。根据上述分类按行政区划分级统计,即分省(自治区、直辖市)、地区(市、州、盟)、县(市、旗)、(区)、乡、村、组,市以下分(镇)、区、街道办事处、居委会、居民小组的行政系统统计。根据设计工作的要求,各项实物指标还要按淹没、浸没、坍岸滑坡、库周影响区的范围分别汇总。

调查深度 按设计阶段和淹没对象的重要性而定,中国在 1986 年试行的《水利水电工程水库淹没实物指标调查细则》规定,主要指标的精度要求如下表。专项设施的精度可按房屋的精度取值。

项 目	精度(%)	
	可行性研究	初步设计
人口	90	95
房屋	90	95
水田、水浇地、商品菜地	85	90
旱地、林地、牧场	80	85

调查方法 水库淹没实物指标调查是一项专门调查,不同于一般的统计调查。采用的方法一般有:①全面调查。这是库区专门调查的基本手段,属普查性质,为不连续的一时调查;即对库区各项统计指标的总体一一加以调查,从而取得各项指标的总体数据。在可行性研究阶段一般选择一些主要指标作全面调查。在全面调查时,由于确定调查统计层次的不同,会影响调查成果的精度。在调查准备阶段需要编制专门的调查大纲及调查、统计表格,并须对调查人员进行集训和试点。②典型调查。在确定被查项目的总体中选取一部分有典型意义的或有代表性的单位,作详细调查,从而用典型单位组成的总体指标平均值,推断整个总体的指标总量,但推断的结果只能得到一个近似值。为取得推断总量的可靠性,要求其调查单位的数量,要达到所求总量的 25%以上才能采用。因此,这种方法只能用于

精度要求不高的调查项目。③填图调查。主要用于调查库区各类用地面积的数量,一般采用比例尺1:5000~1:10000的库区专用地形图为宜,由专业人员实地填绘土地利用现状图,用求面积仪器量算各类土地的面积。它的精度皆比通常的实地丈量或调查为高,又可减少外业调查工作量,尤其可以较正确的求得几个设计水位方案及相应回水区的淹没土地面积。今后应予逐步推广,利于提高调查精度。④遥感遥测调查。运用航天卫星像片、航空像片,绘制库区土地利用现状图,量算各类土地的面积。这项新技术,中国近几年来已在几个工程中试用,由于目前存在判图解释地类界不准;行政区划的边界仍须实地调绘;对回水线不易显示;故尚不能完全满足调查的要求,但其量算库区土地利用的总量和其中某些项目的总体量的精度比常规调查要高,且可节省调查时间和野外作业。目前在河流规划中,调查各梯级水库的淹没土地面积可采用此法,今后如果在科技上解决了上述问题,就可应用于各个设计阶段,所以是发展方向。

(张根林)

shuiku youfa dizhen

水库诱发地震 (reservoir induced earthquake) 在特殊的地质背景下,因水库蓄水引起水库区及其邻近地区内发生异常地震活动的现象。目前世界各国已有一百余起水库诱发地震实例,其中中国有十余例。震级大于5级的水库诱发地震已有5例,最大震级为6.5级,1967年发生在印度柯依那(Kayna)大坝,造成坝顶裂缝等震害。1961年中国广东省新丰江大坝发生主震为6.1级的中国最大的水库诱发地震,导致坝体顶部裂缝。根据已有实例,初步得出水库诱发地震的特点:①地震活动范围限于库区附近;震源浅;大部分震级不大,但烈度偏高。②地震活动与蓄水关系复杂,多数水库的地震活动在蓄水前期或主震前与水位涨落呈正相关,但有一定滞后现象,而蓄水后期或主震发生后则其相关性及滞后现象等不明显。个别水库的地震活动与水位升降呈负相关。③地震序列中最大余震和主震比较接近,余震衰减较慢。在地质背景条件方面,水库诱发地震的特点有:①大多数水库诱发地震发生在无震区或弱震区,与新的构造活动并无明显的相关性。②水库蓄水诱发地震并非普遍现象,只是在少数具有库水向岩层深处集中渗透的特殊地质背景下才能发生。③碳酸盐岩层的发展震机率高,但一般震级不高,而火成岩能积累高应变能,可以诱发震级较高的地震。④坝高、库容与诱发地震机率及其强度并无明显相关性。

水库地震的成因目前尚处在初步探索阶段。研究

的主要内容包括:①诱震地质背景(如岩性、构造类型和规模、新的构造活动、水文地质条件等)。②蓄水情况(如水深、库容、蓄水速度、高水位持续时间及蓄水环境等)。③库水的各种作用(如孔隙压力及其扩渗,水重及其引起的库底沉陷和挠曲,岩体软化、楔裂和应力腐蚀,软弱结构面的泥化和断裂面的润滑,由水体加热、汽化、冰冻和岩体浸润产生的膨胀等)。④小震串裂等作用。迄今为止,比较普遍的解释是:在一定的构造应力背景下,库水存在向岩体深部渗透的条件,岩体中孔隙压力增大,断层面有效应力减小,抗剪强度降低,导致产生破裂和错动。

目前,在重要的大坝工程设计中,当经论证在蓄水后有可能诱发地震时,常在大坝蓄水前两年,在库区设置地震台站以监测蓄水前后的微震活动变化。

参考书目

国家地震局地质研究所,中国诱发地震。北京:地震出版社,1984

(陈厚群)

shuiku yuji

水库淤积 (reservoir sedimentation) 水库内因流速减缓,使水流挟带的泥沙在水库内发生沉积的现象。

水库淤积是世界性的问题,美国水库淤积量每年达到 $1200 \times 10^8 \text{ t}$,年平均库容损失率达0.71%;日本库容大于 10^6 m^3 的水库至1979年已淤去6.3%。

中国有很多河流的含沙量高、输沙量大,水库淤积问题十分严重,据20世纪80年代初对231座大中型水库的调查,泥沙淤积量达115亿 m^3 ,占这些水库总库容804亿 m^3 的14.2%。

水库淤积危害 主要有:库容减少,使水库防洪标准和兴利效益降低;回水末端淤积向上游延伸,抬高洪水位,增加淹没损失和浸没损失;变动回水区泥沙堆积会影响航运;坝前淤积可能堵塞船闸的引航道和引水闸孔等。

水库淤积形态 按纵剖面形态可分为3类:三角洲淤积、带状淤积和锥体淤积。

(1) 三角洲淤积。当水库库容较大,来沙较粗且经常处于高水位运用时,淤积体常形成三角洲形态。三角洲淤积体的上游部分称为尾部段,进库泥沙在该河段开始落淤。三角洲的主体称为顶坡段,这里水流挟沙情况接近平衡状态,淤积河床纵坡与水面线近似平行。三角洲顶点的下游为前坡段,此段水深坡陡,流速锐减,泥沙大量淤积,也是异重流开始潜入的河段。三角洲前坡脚至坝前段以细沙淤积为主。见图1。

(2) 带状淤积。当来沙量少、泥沙颗粒细且库水位

变幅很大时，常形成沿程淤积厚度比较均匀的淤积形态。见图 2。

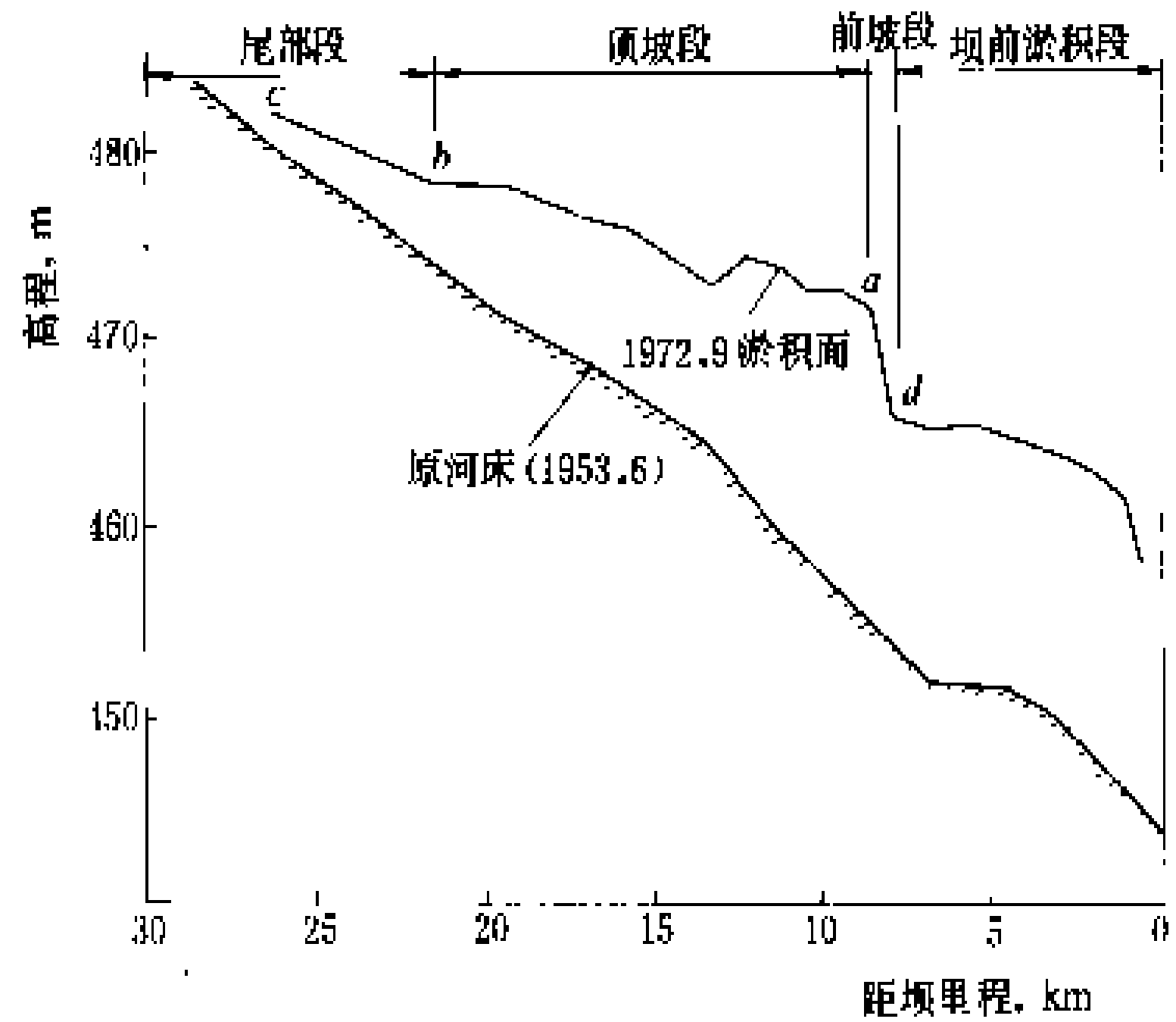


图 1 官厅水库 1972 年汛后三角洲淤积形态

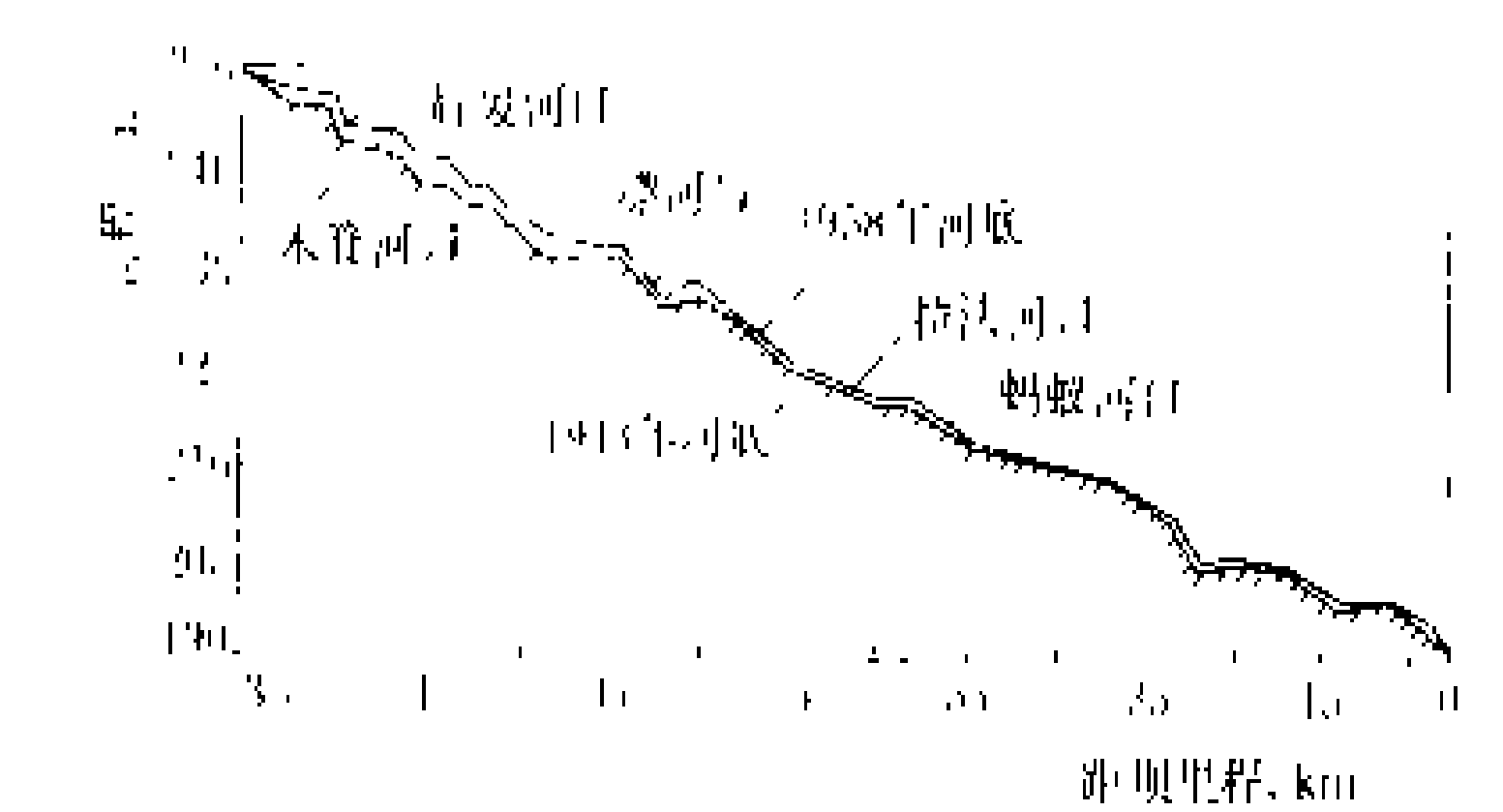


图 2 丰满水库的带状淤积形态

(3) 锥体淤积。当水库库容不大，河流含沙量高，泥沙颗粒细，库水位较低，库区地形狭窄时，泥沙淤积很快发展到坝前，就容易淤积成厚度上小下大的锥形体。见图 3。

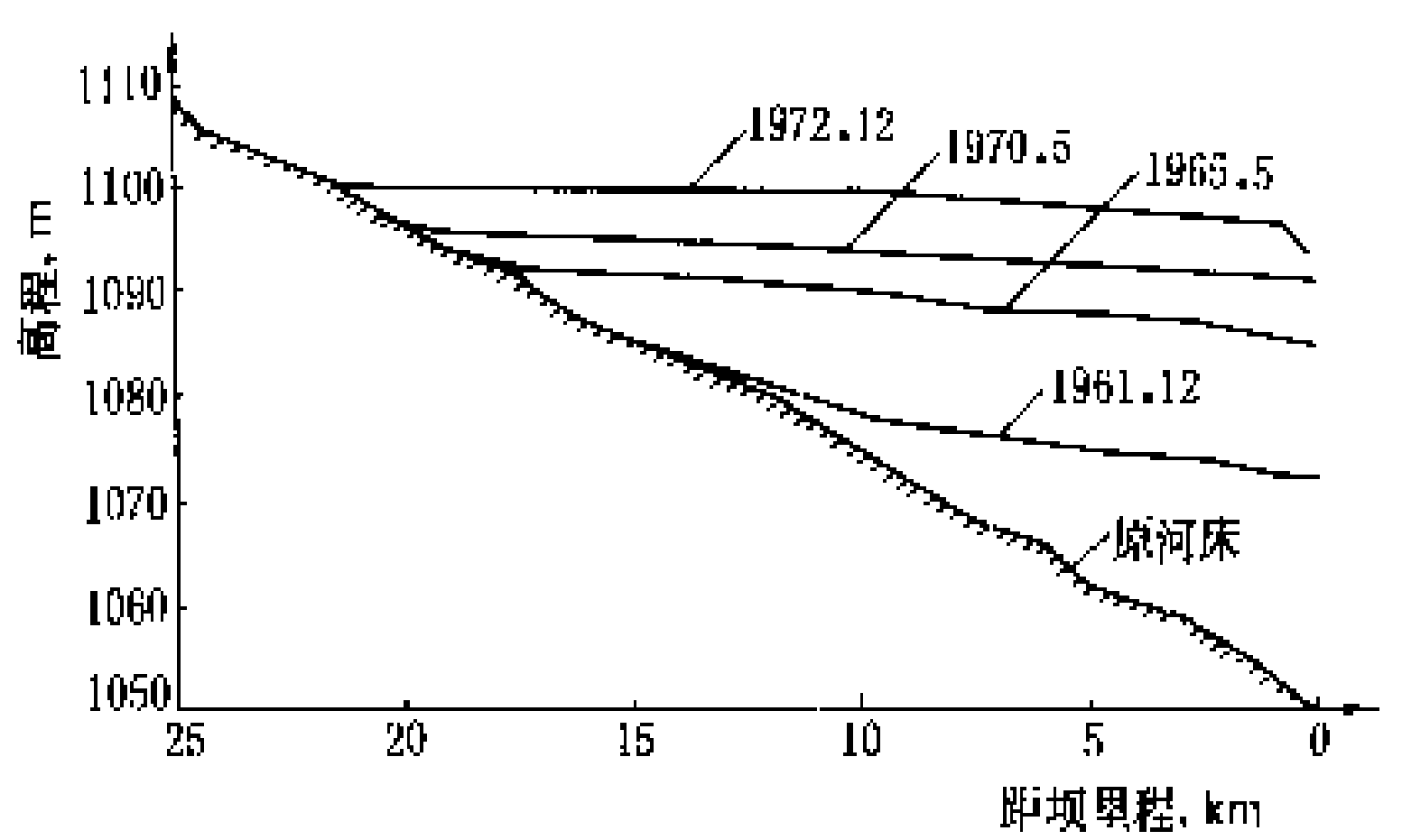


图 3 巴家嘴水库锥体淤积形态

水库淤积计算 进行水库淤积计算主要有 3 方面的内容：①进库沙量的确定。一般常依据坝址附近的水文站实测资料或用经验类比法确定。②淤积量计算。常用的方法为有限差分法和形态法。有限差分法是根据本河段的水流挟沙能力关系逐时段逐河段地进行计算；形态法则依据实测资料建立水力因素与水库排沙比的关系用以计算水库淤积量。③淤积形态计算。有限

差分法常把各库段淤积量平均分配在本库段内；形态法则需根据顶坡比降等形态参数确定淤积量分布。随着计算机技术的发展，现在已有很多数学模型用来计算复杂的水库淤积问题。

水库淤积防治 一方面在水库上游开展水土保持，控制土壤侵蚀，以减少进入水库的沙量；其次是把进入和淤积在水库中的泥沙设法排出库外。排沙方法主要有：①水力冲沙，即在洪水期间把库水位降低或泄空水库冲沙。此法需弃水，会使水库综合利用效益受到一定影响。②异重流排沙：干旱地区的水库，常采取异重流排沙以节省排沙所耗水量（见异重流）。③机械清淤：主要用于中小型水库。清淤机械主要有挖泥船、气力泵及水力吸泥装置等。

参考书目

钱宁，张仁，周志德，河床演变学，北京：科学出版社，1987

(姜乃森)

shuili fadian

水力发电 (hydropower) 开发河川或海洋的水能资源，转换水能为电能的工程技术。采取集中水头和调节径流等措施，把天然水流中蕴有的位能和动能经水轮机转换为机械能，再通过发电机转换为电能，最后经输变电设施送入将电能电力系统或直接供电给用户。水力发电有多种形式，利用河川径流水能发电的为常规水电；利用海洋潮汐能发电的为潮汐发电；利用波浪能发电的为波浪发电；利用电力系统低谷负荷时的剩余电力抽水蓄能，高峰负荷时放水发电的为抽水蓄能发电。

基本原理 水体由上游高水位，经过水轮机流向下游低水位，以其重力做功，推动水轮发电机组发出电力。机组单位时间内输出的电能称为功率，它与上下游水位差(称为水头)和单位时间流过水轮机的水体体积(称为流量)成正比，可以下式表示

$$P=9.81\eta QH$$

式中 P 为水力发电的功率，kW； η 为引水系统、水轮机和发电机的总效率，($\eta<1.0$)； Q 为通过水轮机的流量， m^3/s ； H 为水头，m。

特点 水力发电有下列特点。

(1) 水能是可再生能源。地球表面以海洋为主体的水体，在太阳能的作用下，蒸发成水汽升到高空，在风力推动下，部分水汽被吹向大陆，在适当条件下凝结成水滴下降，经地面汇集补给河川径流，汇入海洋。这是一个以太阳热能为动力的水文循环，周而复始，永不停息。河川径流是这一循环中的一个环节，因而水能资源不断再生。潮汐能是由月球和太阳的引力作用产生

的,波浪能是由风力作用产生的,也都不断再生。利用这些可再生的水能发电,可节省火电和核电消耗的煤、油和铀等不可再生的宝贵矿产资源。

(2) 水力发电是清洁的电力生产,不排放有害气体、烟尘和灰渣,没有核辐射污染。

(3) 水力发电的效率。常规水电站水能的利用效率在 80%左右,而火力发电厂的热效率只有 30%~50%。

(4) 水力发电承担着一次能源开发和二次能源转换的双重任务。建设水电站所需的投资和建设工期,与建设火电厂及其所需燃料的开采、运输等工程的投资和建设工期差不多。

(5) 水力发电的生产成本低廉。无需购买、运输和贮存燃料;所需运行人员较少、劳动生产率较高;管理和运行简便,运行可靠性较高。

(6) 水轮发电机组起停灵活、增减出力快,出力可变幅度大,是电力系统理想的调峰、调频和事故备用电源。

(7) 受河川天然径流丰枯变化的影响,无水库调节或水库调节能力较差的水电站,其可发电力在年内和年际间变化较大,与用户用电需要不相适应。因此,一般水电站需建设水库调节径流,以适应电力系统负荷的需要。现代电力系统,一般采用水、火、核电站联合供电方式,既可弥补水力发电天然径流丰枯不均的缺点,又能充分利用丰水期水电电量,节省火电厂消耗的燃料。潮汐能和波浪能也随时间变化,也宜与其他类型电站配合供电。

(8) 水电站的水库可以综合利用,承担防洪、灌溉、航运、城乡生活和工矿生产供水,养殖、旅游等任务。如安排得当,可以做到一库多用,一水多用,获得最优的综合经济效益和社会效益。

(9) 建有较大水库的水电站,有的水库淹没损失较大,移民较多,并改变了人们的生产生活条件;水库淹没影响野生动植物的生存环境;水库调节径流,改变了原有水文情况,对生态环境有一定影响。这些问题需妥善处理。

(10) 水能资源在地理上分布不均,建坝条件较好和水库淹没损失较少的大型水电站站址往往位于远离用电中心的偏僻地区,施工条件较困难,需要建设较长的输电线路,增加造价和输电损失。

开发原则 水力发电涉及一次能源开发、电力系统规划和运行、水资源综合利用、社会经济发展和生态环境等诸多方面,开发水电要重视以下几点。

(1) 作好地区电源和水电发展规划。根据地区用电负荷发展预测、地区一次能源规划、河流水电规划等工作成果,考虑与其他地区可能的能源与电力交换、水

力发电与其他能源发电的最佳配合、水资源综合利用以及对生态环境影响等因素,按照全系统整体效益最优原则,统筹安排地区电力系统的电源构成和水、火电站的建设时序。

(2) 连续开发河流梯级水电站和分片集中建设水电站群,是节约投资、加快进度的有效途径。

(3) 在淹没、移民允许条件下,在河流上游建大水库可提高全河径流的经济利用。在地形条件许可并对水资源利用有利时,可考虑跨流域引水(见跨流域引水发电规划)或集水网开发方式。

(4) 水电站建设要根据具体条件,因地制宜,大中小型并举,高中低水头并举。在河川水能资源较缺地区,靠近用电中心可选择有利地点建设抽水蓄能电站,以满足电力系统调峰要求。在潮汐资源有利地区,可研究开发潮汐电站。

(5) 重视水电站项目的环境影响,切实做好环境保护设计。

(6) 重视水库淹没损失,做好水库移民安置规划并切实实施,使居民迁移后,能在新的环境中发展生产、安居乐业。

(7) 严格按照基建程序办事。做好水电站项目的可行性和初步设计。

建设规模 自 1950 年起,联合国对世界各国的电力发展进行统计。全世界 1950 年共有水电装机容量 72000 MW,其中欧美日澳新发达国家占 92.3%,亚非拉发展中国家仅占 7.7%。至 1990 年,全世界共有水电装机容量 634675 MW,其中发达国家占 68.6%,发展中国家的比重增至 31.4%。40 年内,水电装机容量的平均年增长率为 5.6%,其中发达国家为 4.8%,发展中国家为 9.4%,见表 1。表 2 列出了水电开发较多的 20 个国家 1950~1990 年水电装机发展情况。其中,委内瑞拉、中国、印度、巴西、哥伦比亚、南斯拉夫、苏联等国发展较快,平均年增长率达到 12.5%~7.8%。中国 1949 年全国装机容量计 360 MW(台湾省数字未统计,下同),居世界第 20 位,1990 年水电装机容量为 36045 MW,跃居世界第 6 位,到 1992 年达 40680 MW 超过日本升至第 5 位。40 年内平均年增长率为 12.2%,其中前 3 个 10 年的年平均增长率顺序为 18.3%,12.4%和 12.5%,最近 10 年降至 5.9%。而中国水能资源居世界首位,有很大发展潜力。中国水利电力部于 1978 年根据中国水能资源的具体分布情况,开发条件和国民经济发展需要,从战略角度出发,提出集中建设中国十大水电基地的设想方案。80 年代,这个设想方案已在黄河上中游、红水河、雅砻江等处逐步付诸实施。1993 年 7 月,装机容量为 18200 MW 的三峡水利枢纽也已正式进入施工准备阶段。十大水电基地



表 1 世界各大洲近 40 年水电装机发展情况

洲（或国）别	1950 年水电装机容量		1990 年水电装机容量		1950~1990 年 平均年增长率 （%）
	（MW）	占世界总量 （%）	（MW）	占世界总量 （%）	
欧 洲	29281		171588		4.5
北 美	26456		149522		4.4
日 苏 澳 新	10716		113847		6.1
发达国家合计	66453	92.3	434957	68.6	4.8
拉 美	3422		91039		8.6
亚 洲	1580		89047		10.6
非 洲	546		19332		9.3
发展中国家合计	5548	7.7	199418	31.4	9.4
全世界总计	72000	100.0	634375	100.0	5.6

注：1. 表中欧洲未包括苏联；亚洲未包括日本和苏联的亚洲部分；日苏澳新指日本、苏联、澳大利亚和新西兰合计。
2. 本表资料来源为：联合国《世界能源供给 1950~1974》；联合国《世界能源统计年鉴》1980，1990；中国能源部《中国能源》1990；中国能源部《能源工业统计提要》1990。

表 2 水电开发较多国家水电装机容量发展情况
（按 1990 年水电装机容量大小排序）

序号	国 家	各 年 水 电 装 机 容 量（MW）					1950~1990 平均年增率 （%）
		1950	1960	1970	1980	1990	
1	美 国	18675	33193	55752	76651	90141	4.0
2	苏 联	3218	14781	31368	52511	64100	7.8
3	加 拿 大	7782	18643	28298	47770	59381	5.2
4	巴 西	1536	3642	8828	27522	45558	8.9
5	日 本	6559	12678	19994	29776	37830	4.5
6	中 国	362	1941	6235	20318	36045	12.2
7	挪 威	2902	6443	12783	20012	26945	5.7
8	法 国	5272	10231	14996	19285	24747	3.9
9	印 度	562	1846	6386	11794	18864	9.2
10	意 大 利	7407	12899	13335	15826	18770	2.4
11	瑞 典	3230	7005	10862	14859	16331	4.1
12	西 班 牙	1711	4600	10883	12828	16050	5.8
13	瑞 士	2860	5640	9620	11450	12350	3.7
14	奥 地 利	1367	2946	5467	8206	10923	5.3
15	委内瑞拉	70	130	910	2920	7914	12.5
16	墨 西 哥	607	1357	3330	5321	7837	6.6
17	澳大利亚	284	1422	3806	6138	7268	8.5
18	哥伦比亚	240	505	1800	3175	7201	8.9
19	联邦德国	2195	3349	4700	6460	7100	3.0
20	南斯拉夫	287	1450	3645	6330	7000	8.3

注：1. 水电装机容量中，包括常规水电站和抽水蓄能电站。
2. 本表资料来源为：联合国《世界能源供给 1950~1974》；联合国《世界能源统计年鉴》1980，1990；中国能源部《中国能源》1990；中国能源部《能源工业统计提要》1991。

的总装机规模为 192190~197840 MW，年发电量为 10039~10153 亿 kW·h，1989 年水利水电规划设计总院根据实际情况，对此方案做了修正和补充，汇总为中国十二大水电基地。总装机规模 210470 MW，年发电量 9945 亿 kW·h。其中，1989 年已建和在建的计有：装机容量 30830 MW，年发电量 1308 亿 kW·h。十二大水电基地为：

- （1）金沙江水电基地。石鼓—宜宾段，初拟 9 级，总装机容量 47890 MW，年发电量 2611 亿 kW·h。
- （2）雅砻江水电基地。两河口—河口段，初拟 11 级，总装机容量 19400 MW，年发电量 1181 亿 kW·h。

（3）大渡河水电基地。双江口—铜街子段，初拟 16 级，总装机容量 18060MW，年发电量 1010 亿 kW·h。

（4）乌江水电基地。初拟 11 级，总装机容量 8680 MW，年发电量 418 亿 kW·h。

（5）长江上游水电基地。宜宾—宜昌段和清江。前者 5 级，总装机容量 25430 MW，年发电量 1275 亿 kW·h。后者 3 级，总装机容量 2890 MW，年发电量 85 亿 kW·h。全基地总计装机容量 28320 MW，年发电量 1360 亿 kW·h。

（6）南盘江、红水河水电基地。初拟 10 级，总装机容量 13120 MW，年发电量 533 亿 kW·h。

（7）澜沧江干流水电基地。溜筒口—南腊河口段，初拟 14 级，总装机容量 21370 MW，年发电量 1094 亿kW·h。

（8）黄河上游水电基地。龙羊峡—青铜峡段，共分 16（或 15）级，总装机容量 14150

MW, 年发电量 508 亿 kW·h。

(9) 黄河中游北干流水电基地。河口镇—禹门口段, 初拟 8 级, 总装机容量 6090 MW, 年发电量 193 亿 kW·h。

(10) 湘西水电基地。包括沅江、资水和澧水流域。初拟单站装机 2.5 万 kW 及以上的水电站 50 座, 总装机容量 7910 MW, 年发电量 317 亿 kW·h。

(11) 闽、浙、赣水电基地。初拟单站装机容量 25 MW 及以上的水电站 118 座, 总装机容量 14170 MW, 年发电量 412 亿 kW·h。

(12) 东北水电基地。初拟单站装机容量 25 MW 及以上的水电站 44 座, 总装机容量 11320 MW, 年发电量 309 亿 kW·h。

发展简史 数千年前, 人类就利用水力机械进行提水灌溉和农产品加工等生产活动。水力发电是在发电机和输电技术发明并得到实用之后才发展起来的。19 世纪 70 年代末, 法、德、英、美等国开始建设小型水电站, 至今已有 100 多年历史。随着电力系统的不断扩大, 随着水工建设、机电设备制造和输电技术的不断进步, 坝愈建愈高, 水轮发电机组愈造愈大, 水电站单站装机容量迅速增大, 现已达到空前规模。1882 年美国建造了第一座商用水电站, 其装机容量仅 10.5 kW。到 20 世纪 40 年代, 1941 年发电的美国大古力 (Grand Coulee) 水电站的一期工程装机容量就达到了 1974 MW。1984 年 11 月发电的巴西和巴拉圭两国合建的伊泰普 (Itaipu) 水电站装机容量为 12600 MW, 是当今世界上最大的水电站。目前世界上最高的坝为苏联的努列克 (Нурекская) 土坝, 最大坝高 300 m。单机容量最大的机组装在美国的大古力 (Grand Coulee) 水电站, 为混流式机组, 单机容量 700 MW; 最大的灯泡式贯流机组装在美国石岛 (Stone Island) 水电站, 单机容量 54 MW。

中国建设水电站起步较迟。1905 年台湾省曾建龟山水电站。1912 年云南省建石龙坝水电站, 仅装有 2 台容量为 240 kW 的混流式水轮发电机组 (见中国早期水电站)。1949 年以前, 除丰满水电站 (设计规模 563 MW) 和水丰水电站 (设计规模 630 MW) 装机容量较大外, 其它水电站规模均甚小。1949 年以后, 中国进行大规模经济建设, 水力发电事业有了长足发展, 筑坝技术和机电设备制造技术有了很大提高 (见中国大中型水电站)。1981 年 7 月发电的葛洲坝水电站 (见葛洲坝水利枢纽), 设计规模 2715 MW, 最大的轴流转桨式水轮机转轮直径 11.3 m, 机组单机容量 170 MW。1987 年 9 月发电的龙羊峡水电站, 设计规模 1280 MW, 混流式水轮发电机组单机容量 320 MW, 混凝土重力拱坝最大坝高 178 m。1979 年发电的乌江渡水电

站, 大坝建在喀斯特发育地区, 用压力达 6MPa 灌浆处理地基, 建成 168 m 的拱形重力坝。长江三峡水利枢纽, 设计装机容量 18200 MW, 混流式机组, 单机容量 700 MW, 1993 年 3 月开始进入施工准备阶段。

(陆钦侃)

shuili jiance

水力监测 (hydraulic monitoring) 对机组和水电站设备有关参数进行监视测量的技术。监测项目一般有: ①上、下游水位及毛水头; ②水轮机的净水头; ③通过水轮机的流量; ④机组每千瓦小时耗水率; ⑤拦污栅前后水位差; ⑥水轮机过流部分的压力和真空; ⑦水库水温及机组冷却水温; ⑧钢管爆破保护装置等。利用遥测水位计可分别测得上、下游水位和其水位差即毛水头。净水头多用高精度压力表测量; 水轮机流量多在进水管、蜗壳或喷管等处装差压计测量并以流速仪、超声波、电磁流量计或热力学法进行率定。将水头、流量、发电机功率引入简易计算机测量机组千瓦小时耗水率。钢管爆破保护装置只在长压力钢管和设有明管的水电站装设, 一般在钢管的首端或首末两端装设流量计采用过流保护 (超过额定流量的 10%~30%)、差流保护 (首末端流量差 > 10%) 方式自动发出警报信号或关闭进口阀门, 此项保护中国在 627 m 水头的以礼河三级电站采用。在中国西洱河四级水电站则采用电极式水位计以地面积水瞬时升高发出信号进行监视。

(青长庚)

shuili xiangsi yuanli

水力相似原理 (principles of hydraulic similitude) 模型水流与原型水流在空间和时间上保持相似所必需遵循的力学原理。它是水工模型试验的理论基础, 是分析流体运动现象的重要手段。流体流动的相似包括几何相似、运动相似和动力相似。①几何相似, 指模型与原型流场的几何形状和边界条件相似, 即模型与原型的相应长度比尺 $L_r = L_p/L_m$ 为一定值, 脚标 p 和 m 分别代表原型和模型, 而相应的面积比尺 A_r 和体积比尺 V_r 分别为 $A_r = A_p/A_m = L_r^2$, $V_r = V_p/V_m = L_r^3$ 。②运动相似, 指模型与原型中水流质点流线的几何相似, 即要求流速 v 的相似比尺为 $v_r = v_p/v_m = L_r T_r^{-1}$, 加速度 a 的相似比尺为 $a_r = a_p/a_m = L_r T_r^{-2}$, 流量 Q 的相似比尺为 $Q_r = Q_p/Q_m = L_r^3 T_r^{-1}$, T_r 为时间比尺。③动力相似, 指模型与原型中流场相应点的作用力相似。由于作用力 $F = ma$, 作用力的比尺 $F_r = F_p/F_m = \frac{m_p a_p}{m_m a_m} = \rho_r L_r^2 V_r^2$, 式中 m 为质量; ρ 为流体密



度。

水力相似定律是用以推导模型和原型中水流现象相似的准则的理论依据。流体运动中常见的作用力有惯性力、重力、粘滞力、压力、弹性力、表面张力、离心力和振动力等8种。在实际问题中,有的力并不经常起作用,有的力影响很小,故一般只考虑惯性力和其他起主要作用的力来满足相似条件。流体动力相似的必要条件是惯性力的比例与所考虑的主要作用力的比例恒等,这就是水工模型相似定律。常用的有:①重力相似定律,亦称弗劳德(Froude)定律,用于以重力作用为主的水流现象,其相似条件为模型和原型中弗劳德数 Fr 相等,即 $(Fr)_r = V_r / \sqrt{g_r L_r} = 1$, g 为重力加速度。②粘滞力相似定律,亦称雷诺(Reynolds)定律,用于粘滞力起主要作用的流体运动,其相似条件为模型和原型中的雷诺数 Re 相等,即 $(Re)_r = (V_r L_r) / \nu_r = 1$, ν 为粘滞系数。③压力相似定律,亦称欧拉(Euler)定律,用于只考虑压力作用的不可压缩流体,其相似条件为模型和原型中欧拉数 E_u 相等,即 $(E_u)_r = \rho_r V_r^2 / P_r = 1$, P 为压力。④弹性力相似定律,亦称柯西(Cauchy)定律,其相似条件是模型和原型中柯西数 C_s 相等,即 $(C_s)_r = \rho_r V_r^2 / E_r = 1$, E 为弹性模量。⑤表面张力相似定律,亦称韦伯(Weber)定律,用于表面流速小于0.25cm/s,水深小于1.5cm,表面张力起主要作用的情况,相似条件为韦伯数 W_e 相等,即 $(W_e)_r = 1$ 。水工模型试验中以重力相似定律最为常用。

由于模型水流不能同时满足原型各种作用力的相似条件,不能达到完全的动力相似,因之在将模型试验数据推算为原型数据时,由于未模拟的次要作用力的影响,而可能存在一定偏差,此即缩尺效应,需要在模型设计及分析模型试验成果时予以考虑。

(李桂芬)

shuili xue

水力学 (hydraulics) 研究水的平衡和机械运动规律及其应用的学科,是流体力学的一个分支。它广泛应用于水利水电工程建设、城乡建设和环境保护、船舶航运、机械制造、石油开采和运输、金属冶炼及化学工业等部门。

研究内容 分为水静力学和水动力学两部分。水静力学研究水在静止状态下平衡规律和静水压强的分布规律。在水电站建设中需根据水静力学的理论计算大坝上游水的推力及闸门所承受的水压力。水动力学主要研究水体流动的基本规律,包括反映质量、能量和动量三大守恒定律的连续方程、能量方程和动量方程以及水流阻力和机械能损失的理论。对于不可压缩一维恒定总流,上述3个方程的形式为

$$\text{连续方程 } Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{能量方程 } Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{a_1 V_1^2}{2g} \\ = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{a_2 V_2^2}{2g} + h_{w(1-2)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{动量方程 } \Sigma F_i = \rho Q (a_{02} V_{2i} - a_{01} V_{1i}) \quad (3)$$

式中 Q 为通过流量; V_1, V_2 及 V_{1i}, V_{2i} 为1,2断面的平均流速及其在 i 方向的分量; A_1, A_2 为1,2断面处过水断面的面积; Z_1, Z_2 为1,2断面形心点的高度; p_1, p_2 为1,2断面形心点处的压强; γ 为水的容重; g 为重力加速度; a_1, a_2 及 a_{01}, a_{02} 分别为1,2断面的动能修正系数及动量修正系数; $h_{w(1-2)}$ 为两断面间的能头损失; ρ 为水的密度。

在工程技术领域根据水流运动的不同类型,水动力学的研究内容主要分为管道水力学和明渠水力学。管道水力学主要研究管道有压流的过水能力和水流阻力以及管道阀门突然启闭引起的管道内水压力的变化。例如,水电站有压隧洞、高压管道、城市供水的管路系统的水流,以及水电站甩负荷引起的水击等,都属于管道水力学问题。明渠水力学主要研究具有自由水面的水流运动,如河道、水库和渠系的水流,孔口出流、堰流、波浪、水跃、水射流及高速水流等。反映明渠水流的主要因素是水位(或水深)和流量(或流速)。水位和流量不随时间变化的水流称为明渠恒定流,其基本方程为伯努利方程(见明渠水力学)。水位和流量随时间变化的水流称为明渠不恒定流,其一维总流的基本方程为圣维南方程(见明渠不恒定流)。水利水电工程中常见的明渠水力学问题有:①水库回水及洪水调节问题;②河道洪水演进及水电站日调节下游河道不恒定流;③溢洪道泄洪消能问题;④高速水流引起的空化、空蚀及其防止措施等。

按专业领域水力学还可分为河流水力学、水工建筑物水力学、河口海岸水力学、地下水水力学、工业管道水力学和水力机械水力学等分支。

研究方法 分为理论分析、模型试验和原型观测。理论分析是根据水流运动的基本规律建立理论方程及数学模型,求其解析解或用数值计算方法借助计算机求近似解。由于水流运动十分复杂,在建立方程时常需进行适当概化,如假定水是不可压缩的,水的粘滞性应力符合牛顿摩擦定理等。模型试验是根据相似原理,模拟实际水流条件,由模型得出的数据推算原型情况。模型试验可以有控制地进行系统研究,但存在缩尺影响。原型观测是对天然河流或已建工程现场观测取得真实资料进行分析,没有比尺影响,但难以在控制条件下作系统研究。对于复杂的水力学问题常用几种方法结合进行研究。

简史及发展 水力学的萌芽可以追溯到很早的时

代。公元前 250 年阿基米德 (Archimedes) 提出的浮体原理, 是水力学发展史上最早的记载。中国古代 2000 多年前修建了都江堰, 表明对明渠水流和堰流已有一定认识。

16 世纪以后水力学有了重要发展。例如, 水静力学中引用了刚体静力学的方法研究液体的平衡; B. 帕斯卡 (B. Pascal) 提出液体中压力传递的定理; E. 托里切利 (E. Torricelli) 提出孔口泄流公式; I. 牛顿 (I. Newton) 提出流体的摩擦定律。至 1788 年 D. 伯努利 (D. Bernoulli) 提出水动力学的能量方程后, 水力学才初步形成一门独立的学科。20 世纪以来, 世界各国水力学家运用现代实验技术以相似理论和量纲分析的实验理论为基础, 同时也吸取了流体力学的基本理论来分析水流现象, 使实验工作具有较为牢固的理论基础。

20 世纪 50 年代以来, 中国在明渠恒定流、高速水流及泄洪消能防冲等方面的研究, 取得了显著的成果。随着生产建设的发展, 高坝和巨型水电站的修建, 海洋的开发和环境污染的防治等, 不断对水力学提出新的要求; 现代流体力学的进展渗透入水力学更多新的理论和方法; 现代量测技术 (如激光、热膜、同位素、微机控制、各种电子仪器以及遥感技术) 的引用, 使对复杂流动和水流内部结构的量测成为可能; 电子计算机的广泛应用解决了许多过去难以计算的问题。这些进展使水力学的研究从一维流动为主, 扩展到二维、三维流动, 从等密度发展到变密度、变温度流动, 从单相流动扩展到多相流动 (如挟沙水流), 从初期的水量研究扩展到水质研究。由于服务领域和研究方法的发展, 除传统的水力学分支外, 又崛起一批新的学科分支, 如计算水力学、随机水力学、环境水力学、高速水力学、电站水力学和工业水力学等。

参考书目

清华大学水力学教研组. 水力学. 北京: 人民教育出版社, 1981

(余常昭)

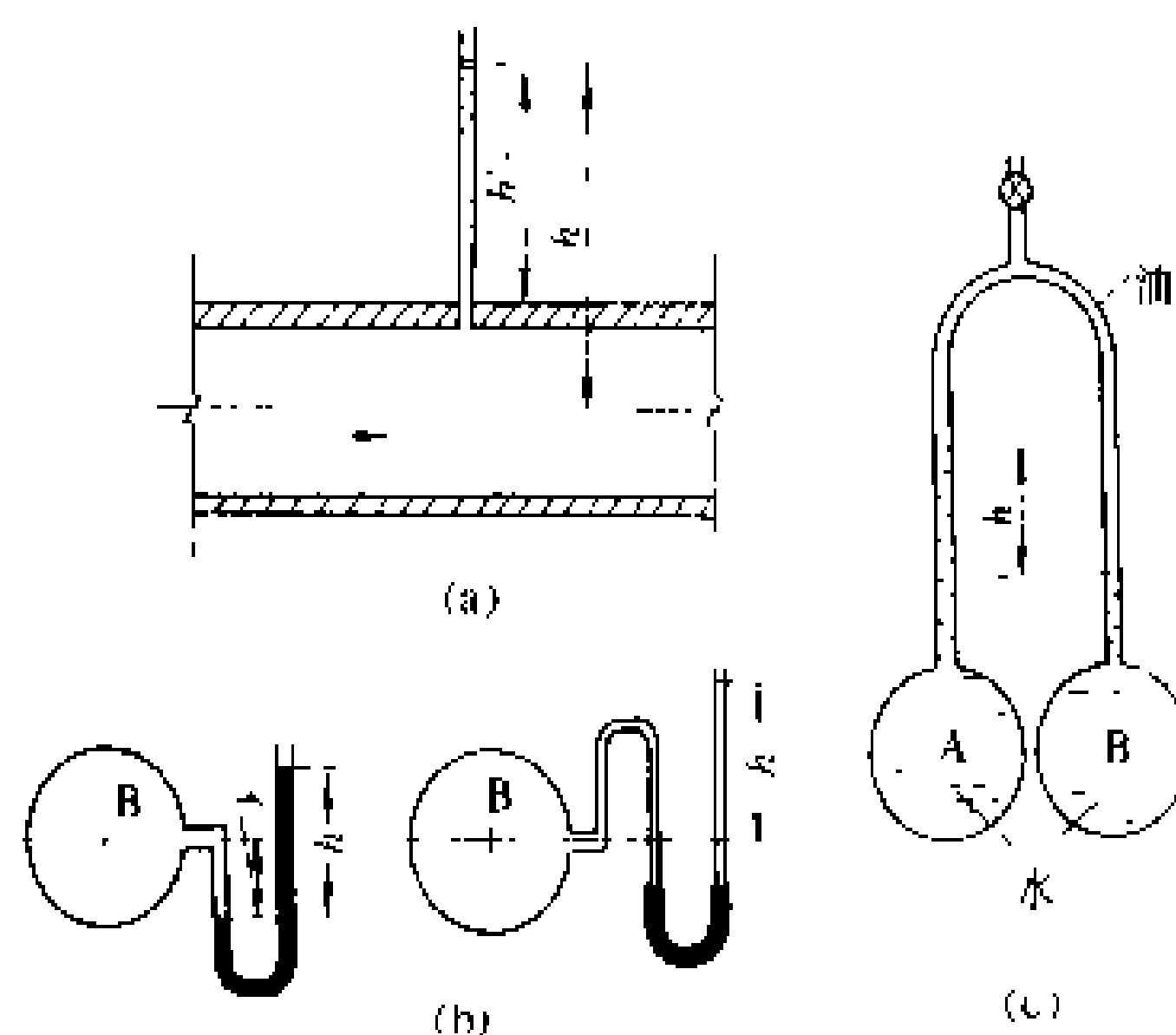
shuili yaosu liangce

水力要素量测 (measurement of hydraulic parameters) 在水工模型及原型中, 对水位、压力、流速、流向及流量等水力要素进行量测的技术。通过各种量测手段, 测取模型中各项水力要素值, 以了解和掌握水流运动规律, 并根据水力相似原理, 换算为原型的水力要素值, 为江河湖泊治理、水库及水电站设计和运行提供依据, 也是发展水力学学科的重要基础。

水位量测 量测江河、湖泊、水库、海洋及各种水工建筑物附近及其模型中的水面高程。量测仪器主要

有水尺, 测针, 浮筒式、电阻式、电容式水位计, 以及超声波水位计等。水尺可以固定在岸边或建筑物上, 直接用肉眼观测。测针主要用于试验室内, 可以固定在需要施测的位置上, 用肉眼或电信号进行观测。电测水位仪量测某一部位的水位变化时, 将其感应部分放入水中, 由接收部分记录水位变化曲线。

压力量测 用测压管、压力计、比压计、压力表及压力传感器量测水流流道边壁上的压力。①测压管是在边壁开小孔接开口玻璃管, 直接用水柱高度反映压力大小 [图 (a)]。②压力计是用比重较大的液体置于测压管中, 以量测较大压力 [图 (b)]。③比压计用于量测两点之间的压强差 [图 (c)], 比压计中的液体应与所测液体接触后不掺混、界面明显及温度对其重率影响不大者为宜。④压力表是利用弹性敏感元件在受压后发生变形的特性及杠杆原理, 经过率定后安装在施测部位进行量测。⑤压力传感器有电阻、电感或电容式, 它将压力转化为电量, 由电测仪器接收记录, 它可以量测压力随时间变化的过程。



压力量测仪器示意图

(a) 测压管; (b) 压力计; (c) 比压计

流速量测 量测水流流速的大小和方向, 常用的方法和仪器有浮标示踪法、毕托管法、旋桨式流速仪法及电测法等。①浮标示踪法, 即在水流表面放置随水漂流的浮标, 测定它依次流过距离已知的两断面所需的时间和位置, 计算出水面流速和流向。在水流中注入示踪剂, 可测量水流任一部位的流速。②毕托管法, 是试验中常用的测流仪器, 利用管身近水端滞点压强最大、流速为零的原理设计的, 量测管端及两侧测压管的压差 Δh , 即可用 $v = \Phi \sqrt{2g\Delta h}$ 算出流速, 式中 Φ 是率定得到的流速系数; g 是重力加速度。现在已有各种形式的毕托管、毕托柱、毕托球等。③旋桨式流速仪, 在江河中普遍采用, 由率定得到旋桨转速与流速关系。近期研制了光电式、电阻式、电感式等微型旋桨式流速仪, 测速范围 3~50 cm/s, 在试验室低流速量测中应用。



④电测法，有激光测速仪、热线-热膜流速仪等，应用还不普遍。

流向观测 一般采用在水面抛投漂浮物，以目测其漂流方向随手勾绘水流表面的平面流向，或用定时间断摄影将浮标移动方向整理于平面图中。在模型试验中，还可以用细线固定在水流底部测其流向，或将高锰酸钾溶液注入水流中，及采用专门仪器测取不同水深处的水流流向。

流量量测 量测方法有用标准容器直接量测已知时段内流入容器的水量计算，在已知断面上量测流速分布计算，以及量测上下游水位差计算等多种。常用的有：①量水堰。利用矩形、三角型或曲线型堰，量测堰上水头，用水力学公式及试验得出的流量系数计算。②文德里流量计，基于水流连续和能量守恒原理，量测上下游压力差，用公式计算。③浮子流量计，利用在一定范围内雷诺数与绕流流速保持固定关系的原理，由测定锥形变截面竖筒中浮子的高度，可测出很小的流量。④电磁流量计，根据电磁感应原理，通过测定作为导体的水切割磁力线所感生的电动势，换算流量值。

(李桂芬)

shuiliu xiesha nengli

水流挟沙能力 (sediment transport capacity) 单位时间内水流通过某一冲淤平衡河段所挟带的全部沙量，包括推移质和悬移质两部分。推移质挟沙能力通常用单位时间的输沙量表示。由于考虑的条件不同，可以得到不同形式的表达式，推移质输沙率通常和流速的高次方成正比，故对于流速变化反应灵敏（见推移质泥沙）。悬移质挟沙力的研究主要有扩散理论和重力理论，按此导出的挟沙力公式以 H. A. 爱因斯坦 (H. A. Einstein) 公式，和 M. A. 韦利卡诺夫 (M. A. Великанов) 的公式较有代表性。

爱因斯坦公式

$$g_s = 11.6 \gamma_s u_* S_{m\alpha} \left\{ 2.303 \log \left(\frac{30.2h}{\Delta} \right) I_1 + I_2 \right\}$$

$$\begin{aligned} \text{式中} \quad I_1 &= 0.216 \frac{A^{2-1}}{(1-A)^2} \int_A^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^2 dy \\ I_2 &= 0.216 \frac{A^{2-1}}{(1-A)^2} \int_A^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^2 \ln y dy \\ A &= \frac{a}{h}, Z = \frac{\omega}{Ku_*} \end{aligned}$$

g_s 为悬移质单宽输沙率； $S_{m\alpha}$ 为悬移质在高程 α 处的体积比含沙量； y 为距床面的高程； Δ 为边壁粗糙度； h 为水深。

韦利卡诺夫公式

$$S_{m\omega} = K \frac{u^3}{gh\omega}$$

式中 $S_{m\omega}$ 为以体积比计的垂线平均含沙量； K 为待定系数； u 为断面平均流速； h 为水深； ω 为颗粒沉速； g 为重力加速度。

由于影响水流挟沙力因素的复杂性，现有理论公式在计算天然河流时还有相当大的偏差。在实际工程计算中，常利用一些经验性或半经验性的挟沙力公式，其中应用较为广泛的有武汉水利电力学院公式

$$S_{m\omega} = K \left(\frac{u^3}{gh\omega} \right)^m$$

式中 K, m 分别为待定系数和指数。

恩格隆-汉森 (Engelund-Hansen) 公式

$$\begin{aligned} f\varphi_T &= 0.3\Theta^2 \sqrt{\Theta^2 + 0.15} \\ \text{式中} \quad \varphi_T &= \frac{g_T}{\gamma_s} \left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{gd_s} \right)^{1/2} \\ \Theta &= \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \times \frac{(u_* d/\nu)^2}{gd_s^3/\nu^2} \end{aligned}$$

f 为达西-韦斯巴赫阻力系数； g_T 为包括推移质及悬移质在内的全部床沙质单宽输沙率。

通过水力学关系建立起来的悬移质挟沙力公式，只能计算床沙质输沙率，因此，在估算悬移质全沙输沙量时，需将冲泻质包括在内，冲泻质来量取决于流域的补给条件，和水力因子缺乏明确的关系，必需依靠野外实测资料的分析来确定。

参考书目

钱宁，万兆惠，泥沙运动力学，北京：科学出版社，1983

(姜乃森)

shuiliu zuli

水流阻力 (hydraulic resistance) 水体与固体边界有相对运动时，由边界压力差和摩擦应力产生的与运动方向相反的作用力。水流阻力分为两类：物面摩擦阻力（沿程阻力）和形状压差阻力（局部阻力）。

物面（沿程）阻力 它与物面状况（壁面相对糙度 k_s/R ），当地流速（ V ），水力半径（ R ）和流程长度（ L ）及重力加速度（ g ）有关，在水力学中用沿程水头损失 h_f 表示，即

$$h_f = \lambda \frac{L}{4R} \times \frac{V^2}{2g}$$

式中阻力系数 λ 是雷诺数（ Re ）和壁面相对糙度的函数， $\lambda = f(Re, k_s/D)$ ，由管道（直径 D ）中进行的系统性实验资料给出，如图 1。阻力系数 λ 视水流流态是层流还是紊流而不同，紊流状态又分为水力光滑、水力

流态	判别条件	阻力系数	水头损失
层流	$Re < 2320$	$\lambda = 64/Re$	水头损失与流速一次方成正比
紊流	水力光滑区 $\frac{u_* \Delta}{\nu} < 5$	$\lambda = 0.3164/Re^{1/4}$ 或 $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2\log(Re \sqrt{\lambda}) - 0.8$	
	过渡区 $5 < \frac{u_* \Delta}{\nu} < 70$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.74 - 2\log\left(\frac{\Delta}{r_0} + \frac{18.7}{Re \sqrt{\lambda}}\right)$	
	水力粗糙区 $\frac{u_* \Delta}{\nu} > 70$	$\lambda = \frac{1}{\left[2\log\left(3.7 \frac{d}{\Delta}\right)\right]^2}$ 或 $\lambda = \frac{1}{\left(2\log \frac{r_0}{\Delta} + 1.74\right)^2}$	水力损失与流速二次方成正比

注：表中 r_0 和 d 分别为管道半径和直径； Δ 为物面糙度； ν 为水的运动粘性系数； $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ 为壁面剪流速。

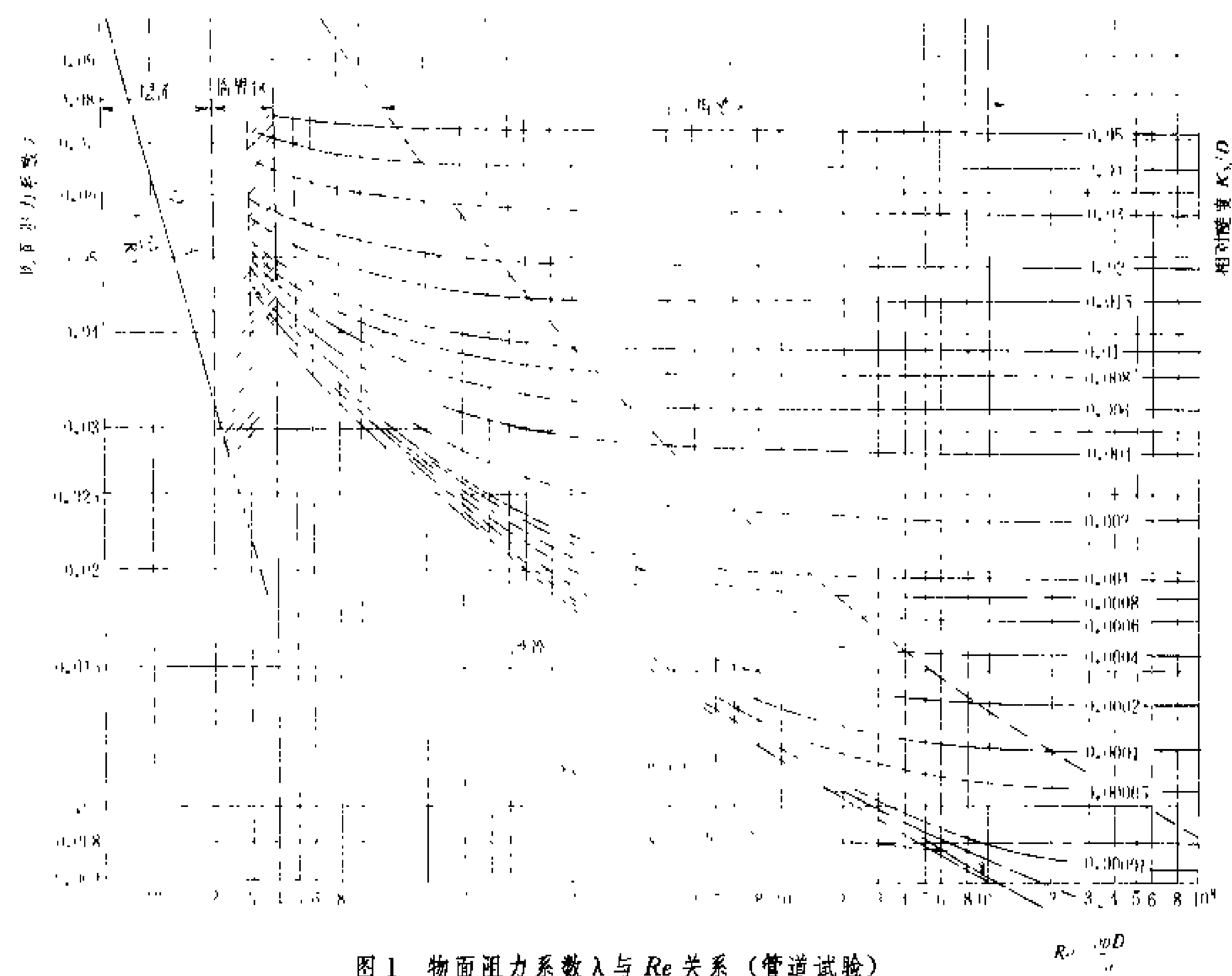


图 1 物面阻力系数 λ 与 Re 关系 (管道试验)

粗糙和过渡区 3 种情况，见表。物面阻力有时用边壁阻力 τ_0 表示，它与 λ 的关系是

$$\tau_0 = \frac{\lambda}{8} \rho V^2$$

明渠水力学计算常用谢才 (Chezy) 系数 C 表示河渠阻力，它与 λ 的关系是

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$$

形状 (局部) 阻力 流场固体边界形状改变处，对水流增加了约束，形成前后压力差，如水电站进水口、阀门段、弯道、泄水管出口突扩等，使通过的水流除物面阻力外，又增加了局部形状阻力，水力学中用局部水头损失表示，即

$$h_l = \zeta \frac{V^2}{2g}$$

其中局部水头损失系数 ζ 因具体形状而不同，通常由

实验测定。水中运动的物体、水工建筑物中的闸墩，因

机驱动旋转。定子静止不动，其绕组切割旋转的励磁磁

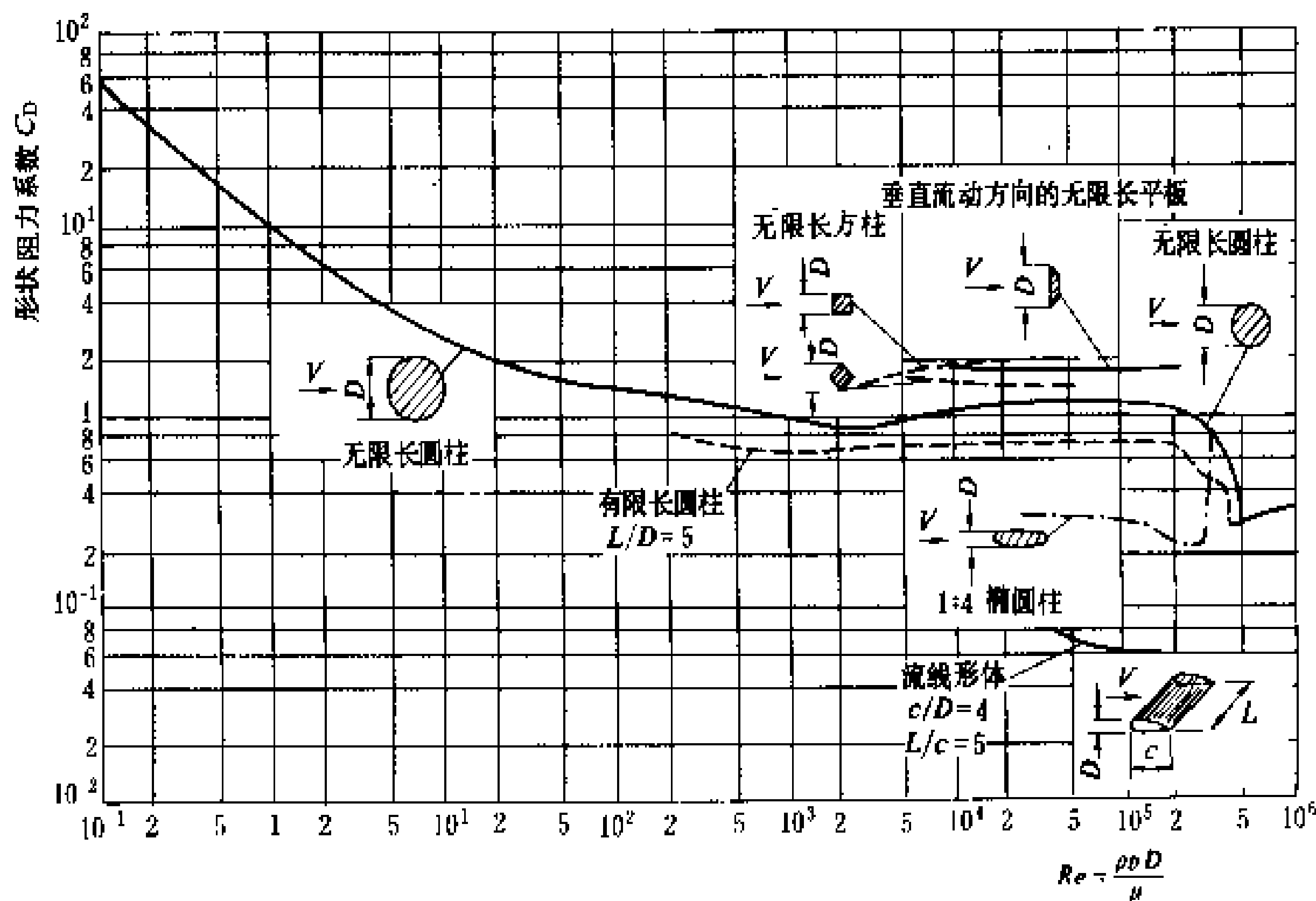


图2 三维绕流物体 C_D 与 Re 关系

绕流边界层分离形成尾流，产生很大的压差阻力，表示为

$$F_D = C_D \frac{\rho V^2}{2} \times A$$

式中 A 为与运动方向正交的物体投影面积， C_D 为形状阻力系数。几种典型物体三维绕流情况下的 C_D 值如图2。物体（如船舶）在水面运动产生波系引起的阻力，称为波阻，它与物体形状和运动速度有极复杂的关系（见波浪）。

（时启燧）

shuilun fadianji

水轮发电机 (hydrogenerator; hydraulic generator)

用水轮机驱动，将机械能转换为电能的交流同步电机。水轮发电机有发电、调相和进相三种运行方式；发电运行时可输出有功功率及无功功率；调相运行时吸收少量有功功率，输出无功功率；进相运行时吸收系统中空载长线所产生的无功功率，同时又向系统送出有功功率。水轮发电机组甩负荷时转速上升，为了限制转速上升在一定范围内，要求机组有较大的转动惯量。水电站一般远离负荷中心，通过长距离高压输电线路接入电力系统，因此水轮发电机参数要考虑电力系统静态和动态稳定的要求。水轮发电机结构要能承受引出线端部突然三相短路和可能发生的飞逸转速（见水轮机飞逸转速）。

基本原理与结构 水轮发电机主要分转子（见水轮发电机转子）与定子（见水轮发电机定子）两大部分。转子的主磁极由励磁电流建立励磁磁场。转子由水轮

通感生电动势。定子线棒在定子铁芯线槽中按三相空间互成 120° 排列，连接成定子三相绕组，其电枢反应形成旋转磁场与励磁磁场相互作用，把水轮机轴功率转换成电功率输出。

水轮发电机由定子、转子、轴承、机架（或轴承座）等主要部件及励磁、冷却、制动、测量、灭火等装置组成。水轮发电机主要结构部件示意图见图1。

（1）定子是水轮发电机的静止部分，由机座、铁芯、绕组等组成。铁芯和绕组是定子的电磁部分；机座连同

机架（见水轮发电机机架）是支持机组的结构部件。

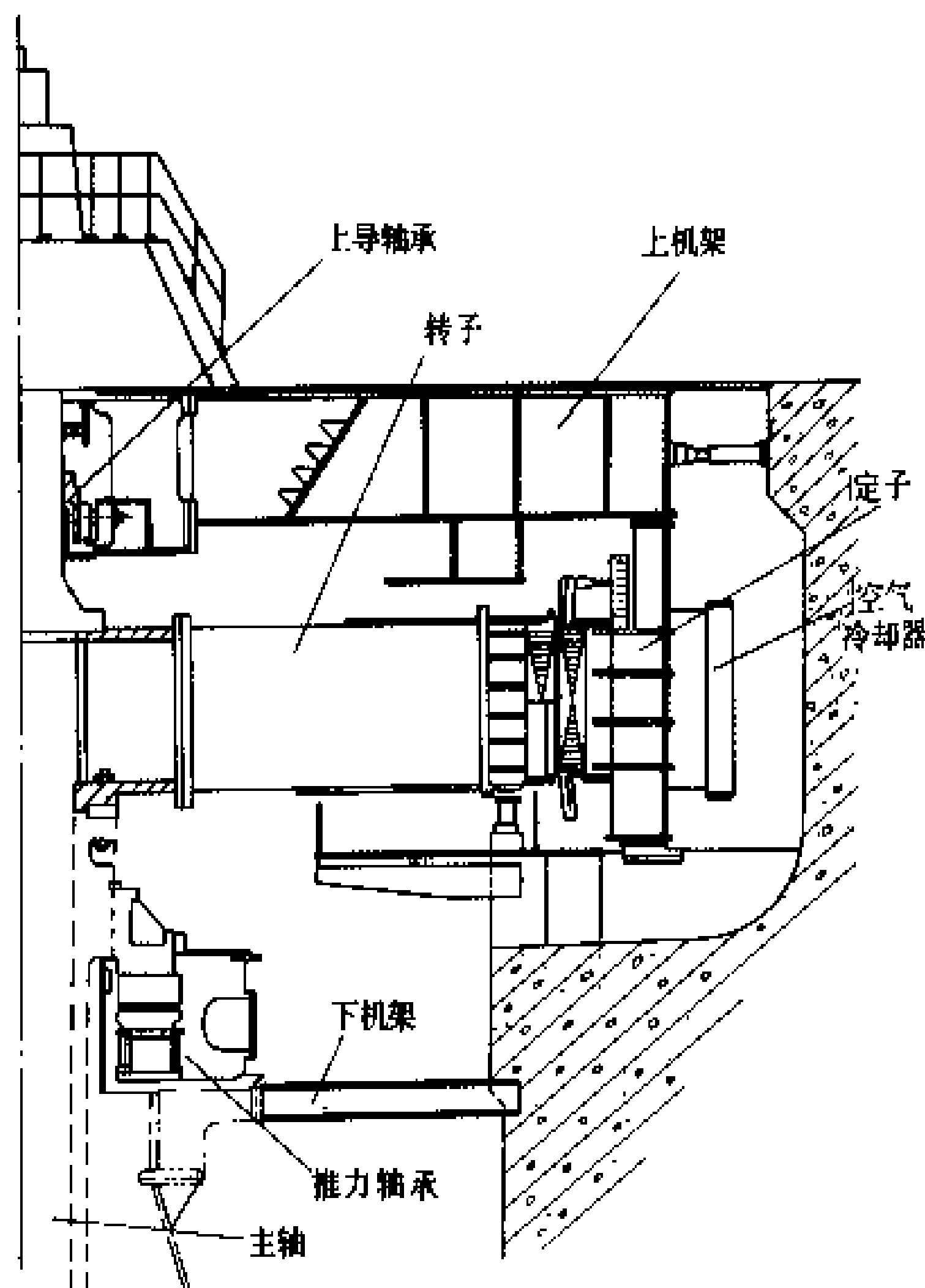


图1 水轮发电机主要结构部件示意图

（2）转子是水轮发电机的转动部分，由磁轭、磁极、大轴、支架等组成。磁轭和磁极是转子的电磁部分；大轴和支架是转子的结构部件。

（3）轴承分推力轴承（见水轮发电机推力轴承）和导轴承（见水轮发电机导轴承）两种。推力轴承承受水轮发电机组转动部分的全部轴向负荷。对于不同型式

的机组,导轴承承受不同的负载,立式水轮发电机只承受机组转动部分的径向不平衡力和电磁不平衡力;卧式水轮发电机还承受转动部分的重量。机架(或轴承座)用于安置推力轴承、导轴承及其他部件。

(4) 水轮发电机通常采用空气作为冷却介质对定子、转子绕组以及定子铁芯表面进行冷却。对于小容量水轮发电机常采用开启式或管道式通风方式。大、中容量水轮发电机采用空气冷却器冷却的闭路循环通风冷却方式。某些大容量水轮发电机为了提高冷却强度,绕组采用中空导线内直接通冷却介质的内冷方式,冷却介质用水或氟里昂。定子和转子绕组均采用水内冷方式的称为双水内冷;只是定子绕组用水内冷方式的称为半水内冷;除定子和转子绕组外,定子铁芯也采用水冷的方式称为全水内冷。(见水轮发电机空气冷却,水轮发电机水内冷,水轮发电机氟里昂内冷)

(5) 水轮发电机组为了在停机过程中缩短低转速惰行时间,采用了制动措施。可以采用机械制动、电制动或混合制动方式(见水轮发电机组停机制动)。

(6) 水轮发电机励磁在电机正常运行时提供所需的励磁电流,以维持发电机一定电压和一定无功功率。当电力系统发生短路或负荷突然变化时,进行强行励磁或强行减磁,以提高电力系统运行的稳定性和可靠性。当发电机正常停机和内部出现短路时,对发电机进行灭磁。

(7) 为了监视水轮发电机的安全运行,需配有转速、温度、压力、液位、流量等测量装置。

(8) 水轮发电机的灭火装置(见水电站防火)是为了迅速扑灭机组内部火灾而设置的,若发电机绝缘采用阻燃结构,原则上可不设灭火装置,但实际使用中设与不设的均有。采用的灭火介质有水、二氧化碳、卤代烷(又称 Halon)等。水喷雾灭火是利用定子绕组端部附近环管上装设的喷嘴,在高压水作用下喷出水雾,隔绝空气而灭火,具有结构简单、无重燃危险的优点,但灭火后机组需干燥,还可能使硅钢片产生锈蚀。二氧化碳灭火是利用液态二氧化碳气化时容积增大的特性,排除空气,同时又吸收大量蒸发潜热,将火扑灭,由于二氧化碳气体能使人窒息致死,因此在使用时应注意人身安全,灭火后要排放二氧化碳气体。全厂可公用一套装置,通过管路切换到每台机组。卤代烷是一种非导电性气体,毒性小,低浓度下即具有明显的灭火效果,缺点是价格较贵。这些灭火装置可以手动或通过热感、烟感元件的自动报警系统启动。为防止误启动,要求报警系统的两种元件同时动作时才开始灭火。

水轮发电机的特性 包括空载特性、负载特性、稳态短路特性、调整特性、外特性及 V 形特性等,通常用曲线表示。这些特性表明在不同条件下,定子端电压

(U , 空载条件下为 U_0)、定子电流 (I , 短路条件下为 I_s) 及励磁电流 (I_f) 三者之间的关系。①水轮发电机空载特性表明发电机在额定转速、输出功率为零的条件下,定子端电压与励磁电流的关系曲线,见图 2 (a)。②水轮发电机负载特性表明发电机在额定转速和恒定负载状态下定子端电压与励磁电流的饱和特性,见图 2 (b);③水轮发电机稳态短路特性表明发电机在额定转速下定子绕组短路电流与励磁电流的关系曲线,见图 2 (c);④水轮发电机调整特性表明发电机在额定转速和给定的功率因数下,保持定子端电压恒定时,励磁电流与定子电流的关系曲线,见图 2 (d);⑤水轮发电机外特性表明发电机在励磁电流、转速及功率因数恒定时,定子端电压与定子电流的关系曲线,见图 2 (e);⑥水轮发电机 V 形特性表明发电机在定子端电压、转速、功率因数恒定时,定子电流与励磁电流的关系曲线,见图 2 (f)。

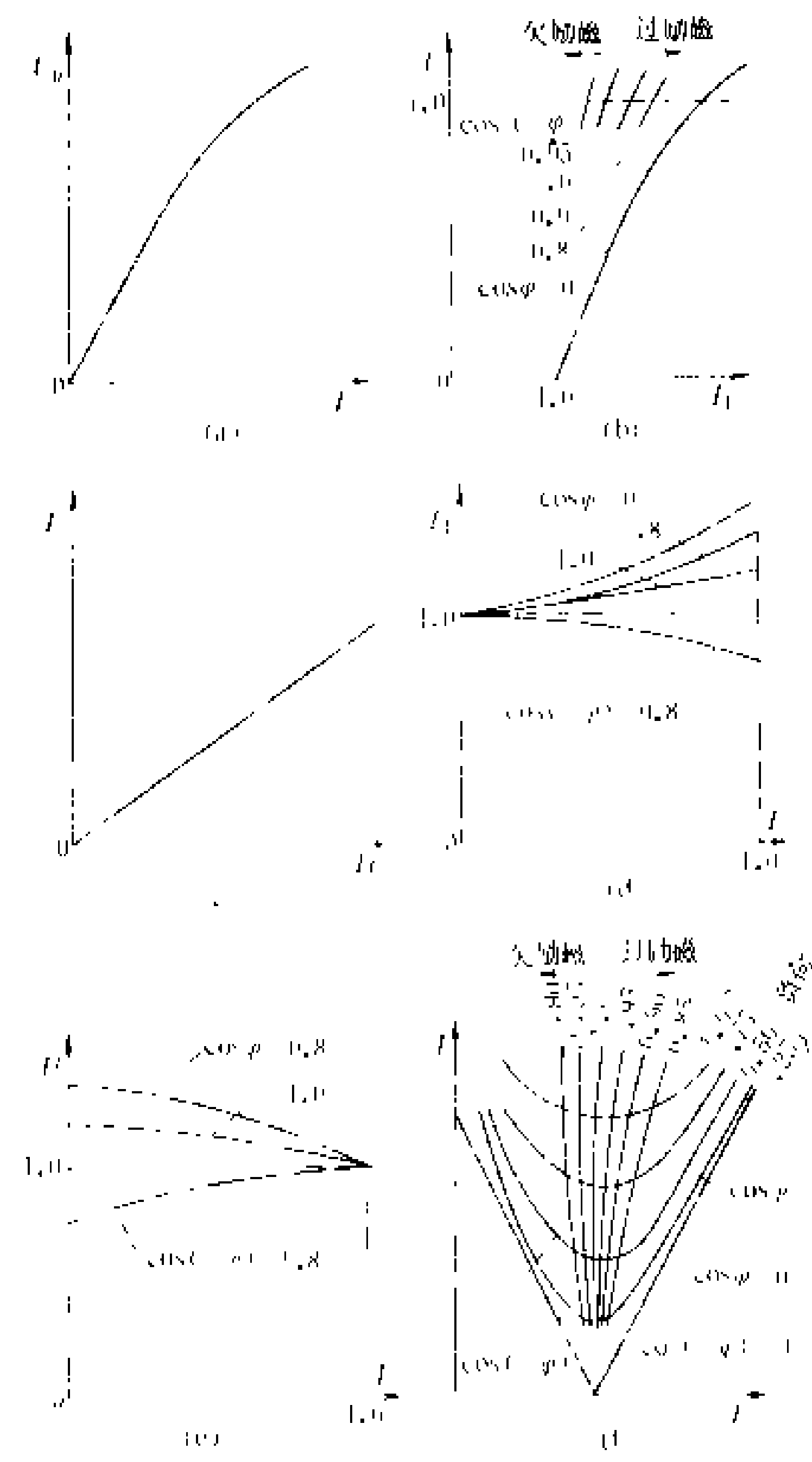


图 2 水轮发电机的特性曲线
(a) 空载特性; (b) 负载特性; (c) 稳态短路特性;
(d) 调整特性; (e) 外特性; (f) V 形特性

基本参数 包括额定容量,调相容量,进相容量,充电容量,额定电压,额定功率因数,短路比,同步电



抗,直轴瞬变电抗,直轴超瞬变电抗,负序电抗,零序电抗,定子非周期分量衰减时间常数,直轴瞬变电流衰减时间常数,直轴超瞬变电流衰减时间常数,转动惯量,额定转速和机械时间常数等。(见水轮发电机基本电气参数)

型式分类 按转轴的装置方式可分为卧式和立式两种(见卧式水轮发电机;立式水轮发电机),通常由水轮机的型式确定;冲击式水轮机驱动的水轮发电机和贯流式水轮机驱动的水轮发电机多采用卧式结构。混流式水轮机或轴流式水轮机驱动的大、中容量水轮发电机多采用立式结构。立式水轮发电机结构根据推力轴承设置位置的不同,又可分为悬式和伞式两种。推力轴承位于转子上部的称悬式水轮发电机,推力轴承位于转子下部的统称伞式水轮发电机。伞式又可分为全伞式和半伞式两种:在推力轴承以上部位无导轴承的为全伞式;有导轴承的为半伞式。按通风冷却系统的冷却介质可分为空气冷却、水内冷和氟里昂内冷三种;按冷却介质的流通和散热方式可分为开启式、密闭式、热交换器式三种;按冷风的传送方式可分为自然冷却和强迫冷却两种。

发展简史和趋势 1960年以前,投运的水轮发电机单机容量不大于150 MV·A。1961年单机容量265 MV·A机组在苏联布拉茨克水电站投入运行;1967年588 MV·A机组在苏联克拉斯诺雅尔斯克水电站投入运行;1975年615 MV·A机组在美国大古力水电站投入运行,1978年该电站718 MV·A机组又投运。1984年824 MV·A机组在巴西、巴拉圭共管的伊泰普水电站投入运行,是迄今已投运的单机容量最大的水轮发电机。冷却方式采用空气冷却或定子水冷、转子空冷。表明推力轴承制造水平的轴承能率(推力负荷×额定转速)可达 $500 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{r/min}$ 。大容量水轮发电机效率已达98.3%~98.9%。

中国最早自行设计制造的水轮发电机是由昆明中央机器厂1941年制造的,单机容量60 kW,安装在当时西康省的雅安电厂。之后,上海华生电机厂生产了单机容量为200 kW·A的水轮发电机。1949年后,中国的水电建设事业开始了新的发展,水轮发电机产品单机容量逐步增大,1953年为15.6 MV·A,1960年为82.3 MV·A,1969年为257 MV·A,1973年为343 MV·A,1984年为356 MV·A。随着单机容量增大,水轮发电机制造技术水平也在逐年提高。研制成无风扇通风系统并已在中、低速水轮发电机上推广应用;研制开发氟里昂冷却技术;通过取消下导轴承的试验研究进而取消下机架部件;采用了定子铁芯现场整圆装压及定子铁芯热压新工艺等都取得了良好的技术和经济效益。大型水轮发电机的效率最高已达98%以上。

已运行水轮发电机的出力系数空冷式达到7.7,水冷式达到12。转子线速度达到150 m/s以上。在冷却方式方面,定子和转子双水内冷技术在60年代就成功地得到应用,343 MV·A双水内冷水轮发电机于1973年在刘家峡水电站投入运行,61.8 MV·A氟里昂内冷发电机于1991年在安康水电站投入使用。推力轴承的最大推力负荷达 $9.8 \times 3800 \text{ kN}$ (3800 tf),轴承能率达 $283 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{r/min}$ 。

(邱景安)

shuilun fadianji anzhuang

水轮发电机安装 (erection of hydrogenerator)

水轮发电机部件在水电站内组装和调试的施工过程。包括定子装配与安装、转子装配、机架安装、推力轴承和导轴承安装、机组轴线检查和调整。

定子装配与安装 小型水轮发电机的定子 in 制造厂装配成整体。大、中型水轮发电机定子受运输的限制,工厂分瓣制造,在现场组装并嵌装合缝线棒。当发电机的定子采取在现场整体装配叠片嵌线时,可提高定子的圆度和刚度,避免铁芯合缝产生振动和噪声。

(1) 分瓣定子装配,包括分瓣定子吊入机坑组装、调整定子铁芯圆度找正中心、嵌装合缝线棒、线棒端接头焊接、绝缘介电强度试验。

(2) 定子现场整体装配,包括机座组装焊接、定位筋焊接、叠压硅钢片、嵌装线棒、端部接头焊接、绝缘介电强度试验。现场整体装配定子,一般是在安装间进行,如因场地条件限制也可在机坑中进行。装配前首先要制定好装配措施,布置好定子基础板支墩。在待组装的定子外壳中心位置设立测量用中心柱,并调整其垂直度偏差符合测量精度要求。定子机座圆度、定位筋间距和半径偏差,要符合设计要求。叠装铁芯要注意清洁整齐,铁芯硅钢片要分段压紧。同时检查铁芯的圆度、垂直度和波浪度等,要符合工艺导则的规定。全部铁芯压紧后,必须检验压紧螺杆的紧度。

(3) 定子铁损试验。在装配好的定子铁芯圆周上,缠绕励磁绕组和测量绕组,用50Hz交流电源使铁芯产生约1T左右的磁感应强度。在试验的90min内,测量绕组的电压、电流,计算单位铁损值并检查铁芯各部温升情况和最大最小温度差,温度差应符合规程规定。定子铁芯做完铁损试验后,在热状态下再次旋紧螺杆压紧铁芯。

(4) 定子嵌装线棒,一般是在机坑中进行。线棒绝缘表面要清洁完好,线棒与线槽配合应严密。嵌装下层线棒和上层线棒以后,按标准分别做工频交流耐压试验。

(5) 端部接头焊接。有银铜(硬)焊和锡(软)焊



两种。银铜焊工艺,要求接头导线和连接板接触平整,不许有较大的间隙,锡焊工艺,要求接头导线和连接套先挂好一层薄的焊锡,装配严实。接头一般用工频或中频交流感应加热焊接。锡焊下端接头一般用灌注法。

转子装配 水轮发电机转子一般在安装场装配,装配场地设有支持转子支臂和磁轭的支墩。转子装配,包括竖轴和组装轮辐、装压磁轭铁片、热打键、挂装磁极和干燥、绝缘介电强度耐压试验、转子吊装。

(1) 竖轴和组装轮辐。调整轴的垂直度达到 0.02 mm/m,竖立于基础上,这是装配转子的基准。大型发电机转子中心体一般是轴的一部分,并具有推力轴承转动体(推力头),其轮辐一般用螺栓联接于中心体上。圆盘结构的轮辐要在现场焊接,焊接时要控制变形。中、小型发电机转子采用轮毂加温套轴,紧固于轴上。轮辐则由辐形支臂联接在轮毂上。

(2) 装压磁轭铁片。磁轭是为了挂装磁极和得到必要的转动惯量,大都是由许多扇形铁片叠压而成。磁轭扇形铁片要按设计要求的搭接方法顺序叠放,按磁轭总高度分段、多次、对称压紧。磁轭压紧螺杆要达到预定的紧度。

(3) 热打键。磁轭和磁极在运行中有离心力,为了避免磁轭与轮臂之间可能产生间隙,一般采用磁轭加热膨胀,用热打键的方法使其具有一定的预紧力。在热打键的过程中同时注意控制调整转子的圆度。近年来有采用浮动结构的转子,转子轮辐为圆盘结构,运行时磁轭与轮辐间允许有均匀的分离间隙。

(4) 磁极挂装。磁极要按重量和极性分配挂装。挂装后打紧磁极键并复查转子圆度。连接磁极绕组接头和阻尼环接头。接头的接触面积应达到规范要求。

(5) 转子全部组装完后,磁极通入一定的电流,进行加热干燥。加热温度不超过 80℃。绝缘电阻合格后按规定进行交流耐压试验。

(6) 转子吊装。起吊离位之前必须就地试吊,检查起吊机具、转子水平、桥式起重机制动情况。转子吊入机坑,转子法兰按水轮机主轴法兰的中心、水平和高程找正后,落在制动器上。

机架安装 机架是支持轴承的结构件。装有推力轴承机座的机架为承重机架;装导轴承和风隔板的机架为非承重机架。机架由机架中心体和支臂组合而成,组合面靠螺栓把合,螺栓受力均匀,并有足够的预紧力。机架上牢靠固定挡风板、隔板、灭火管件等。机架在机坑外组装后吊入机坑,以主轴为中心,用水准仪测量机架水平进行安装。(见水轮发电机机架)

推力轴承和导轴承安装 水轮发电机推力轴承和水轮发电机导轴承的巴氏合金轴瓦一般在安装之前需要研刮,使轴瓦面有均匀的接触点。推力轴承薄瓦与托

瓦接触要平整,导轴瓦的支承块与机座接触要严密。组装后轴承座的绝缘电阻应不低于 1 MΩ。

根据水轮机主轴法兰的高程,调整镜板的高程和水平。对螺栓支承的推力轴承,在机组转动部分处于中心位置、保持镜板水平的情况下,调整支承螺栓,使推力瓦受力均匀;对弹性支承的推力轴承,将转子上、下两部导轴瓦间隙调整在 0.05 mm 以内,用制动器顶落转动部分,检测各弹性油箱的压缩值,并以弹性油箱上的支承螺栓对压缩值进行调整,使其符合要求。然后,旋转机组转动部分,检查镜板的轴向摆动值。推力轴承调整后,检查机组轴线、安装导轴承,并调整轴承轴瓦间隙。轴承封盖之前,对轴承冷却器、瓦冷却管路和高压油顶起装置管路作耐压试验并清扫干净。

机组轴线检查和调整 机组轴线是通过测量机组摆度检查的。一般通过电动或机动方式旋转转动部分,测量励磁机、集电环、上导轴承、下导轴承、联轴法兰及水轮机导轴承处的摆度值,摆度值超过标准时,需进行调整。

参考书目

白延年主编. 水轮发电机设计与计算. 北京:机械工业出版社, 1982

(陈直裁)

shuilundianji daozhoucheng

水轮发电机导轴承 (guide bearing of hydro-generator)

用于承受水轮发电机转动部分的径向机械不平衡力和电磁不平衡力,使机组的轴线在规定的范围内摆动的部件。导轴承由导轴承瓦、支柱螺钉、套筒、座圈、滑转子和油冷却器等主要部件组成。根据水轮发电机的总体结构布置,导轴承的总体结构型式有:①具有单独油槽的导轴承。它一般都有滑转子(热套于轴上并与轴一起加工),导轴承瓦直径较小,瓦块数也较少,在滑转子下缘开径向供油孔,在离心力作用下向轴瓦供油,并使油路经油冷却器形成循环,这种结构适用于大、中容量悬式水轮发电机或半伞式水轮发电机的上导轴承。②与推力轴承合用一个油槽的导轴承。它常将推力头兼作滑转子,具有结构紧凑的特点,但导轴承直径较大,瓦块数也较多。为了向瓦面注油,通常在镜板或推力头上开若干个径向孔,以加强导轴承瓦的润滑冷却,适用于全伞式水轮发电机的下导轴承和中、小容量悬式水轮发电机的上导轴承。③楔子板式导轴承。它是以楔子板代替支柱螺钉,调节螺帽和锁定件装设在轴承油面上靠近轴承盖处,便于调节轴承瓦面与滑转子的间隙,简化了结构和制造工艺。

当水轮发电机磁路不对称、励磁绕组发生两点接地、轴附近存在漏磁通等情况时,轴两端间将出现感应



交变电动势。如果轴承油膜被击穿,并可能形成电流通路时,镜板和轴瓦将因流过轴电流而受损。为此需采取轴绝缘措施,通常是对上导轴承和推力轴承均用绝缘垫与轴承座相绝缘,还可在推力头与镜板之间再加一层绝缘垫,后者兼作安装时调整机组轴线用。轴绝缘的绝缘电阻值应不低于 $1\text{ M}\Omega$ 。

(邱景安)

shuilun fadianji dianyun

水轮发电机电晕 (corona of hydrogenerator)

水轮发电机定子线棒端部表面,线棒与定子槽壁的气隙中,气体介质在不均匀电场中的局部自持放电现象。在发生电晕处发生蓝色晕光,出现放电声及刺激性臭氧味。其原因,主要是线棒未采用良好的防晕处理,以及线棒与铁芯槽壁贴得不紧,在这样的空隙中,空气被电离,发生电火花,同时臭氧和一氧化氮、二氧化氮与空气中水份结合,可形成具有腐蚀性酸,电化作用造成电腐蚀,使绝缘表面烧伤。这种现象,在 20 世纪 70 年代初期中国的大型水轮发电机中,曾发生五次烧损事故,它们是刘家峡水电站 1 号和 2 号机,柘溪水电站 4 号机,以及盐锅峡水电站 5 号和 6 号机,发生电腐蚀时间短的仅半年,时间长的也只有 2~3 年,就发生绝缘损坏。

处理方法:根据制造厂的规定,对已成型的线棒,按照要求,涂好半导体绝缘漆。在安装线棒时,为了防止槽绝缘与槽壁间出现空隙,除制造中严格控制精密度外,目前国外有采用大于空气热导率的合成树脂去填满间隙,既可取得较好的降温效果,又可避免电晕的发生。

(黄宝范)

shuilun fadianji dingzi

水轮发电机定子 (stator of hydrogenerator)

水轮发电机的静止部件。由机座、铁芯、绕组、铜环及基础螺杆等组成。机座是固定铁芯的结构件,铁芯和绕组是定子为了产生旋转磁场和保证磁通及电流通路必备的电磁部分,绕组由许多线棒按一定规律排列而成,线棒通常分两层嵌入铁芯的槽内,以一定的接线方式连接成回路,通过铜环引线汇流后输出电功率。

机座 主要用以固定铁芯,呈圆形或多边形。小容量水轮发电机多采用铸铁整圆机座,或采用钢板焊接的箱形机座。大、中容量水轮发电机的机座由钢板焊接组装而成。作用在机座上的力有:运行中额定扭矩产生的切向力和铁芯热膨胀引起的径向力;定子绕组短路时短路扭矩产生的切向力和转子绕组两点短路时引起

的单向磁拉力。对悬式水轮发电机,机座上还承受上机架和机组转动部分(包括水推力)等重量引起的轴向力,这些力均通过机座传至混凝土基础上。因此机座应有足够的强度和刚度,铁芯外径很大的机座还应考虑适应铁芯热变形的措施。

定子铁芯 水轮发电机定子铁芯是磁路的主要组成部分,并用以固定绕组。由扇形冲片、通风槽片、定位筋、齿压板、拉紧螺杆等零部件装压而成。①扇形冲片常用 0.5mm 或 0.35mm 厚的低损耗、高导磁硅钢片冲制而成。小容量水轮发电机铁芯通常采用拉紧螺杆或用弧键压圈结构进行轴向紧固;大、中容量机组则多采用定位筋与螺杆分开,或定位筋与螺杆合一的轴向紧固和周向定位结构。为了减小铁芯中的涡流损耗,扇形冲片通常喷绝缘漆。②通风槽片是为改善径向通风而设置的,对采用径向通风系统的大、中容量水轮发电机,通风槽片的间隔距离通常为 $30\sim 45\text{ mm}$,其他通风系统可采用较长的间隔距离。通风槽片以厚 $0.5\sim 0.75\text{ mm}$ 的扇形片作为底板,其上点焊固定通风槽钢。大容量水轮发电机一般每齿放置两根,以形成高 10 mm 、宽 $10\sim 15\text{ mm}$ 的通风沟;小容量发电机每齿放一根。③定位筋由方钢加工而成,呈鸽尾形,扇形片就是通过定位筋和托块固定在机座上的。④齿压板由齿压片与压板焊接而成,它通过拉紧螺杆轴向压紧铁芯。通常在每张扇形片上布置两根定位筋、两块齿压板和四根拉紧螺杆。为了提高铁芯装压质量,提高机座刚度,大、中容量水轮发电机的机座下端多采用与机座连成一体的大压板结构。

定子绕组 水轮发电机定子绕组有条式波绕组和框式叠绕组两种型式,前者端部连接线少,适用于大容量水轮发电机;后者端部焊接量小,适用于中、小容量水轮发电机。绕组的绝缘结构要综合考虑耐热等级、电气强度、热老化、介质损失、机械性能、耐电晕等因素。为使定子绕组能承受正常条件下电磁力和振动力的作用,短路条件下不致产生有害的位移和变形,造成绝缘损伤或匝间短路等故障,绕组在槽部和端部都应固定牢。通常槽部采用槽楔压紧。端部一般采用玻璃丝绳或无纬玻璃丝带将绕组与槽口垫块、斜边垫块和端箍等绑牢。检修时还需注意检查立式水轮发电机线棒下沉、磨损情况。

铜环 绕组出线的汇流排,并由此引接出线。铜环数量由定子相电流大小确定;对于叠绕组,当支路电流为 $2000\sim 8000\text{ A}$ 时,两支路或四支路用一个铜环引出;对于波绕组,当支路电流为 $1000\sim 3000\text{ A}$ 时,每支路用一个铜环引出。

基础螺杆 定子机座与基础底板的连接件,其一端埋入定子基础孔中,另一端通过基础板与基座连接



固定。(见水轮发电机基础)

发展简况 大容量水轮发电机的定子外径已超过 20 m。为减小热应力,研究采用了定子浮动式机座或定子机座与基础板、上机架连接处设置斜翼板结构,但对铁芯温升高于机座而产生的压应力施加于机座的问题仍未解决好。有的制造厂采用了无机座结构,利用定子垂直梁和力矩板使铁芯热应力产生的径向力和切向力获得补偿,但仍存在着结构复杂和现场组装工作量大的特点。

(邱景安)

shuilun fadianji fuli'ang nailing

水轮发电机氟里昂内冷 (freon cooling of hydrogenerator)

将液态氟里昂通入导体内部的冷却方式。氟里昂内冷的特点是:①由于氟里昂蒸发时的导热能力比空气高 200 多倍,比水高 5 倍多,因此在相同条件下,采用氟里昂内冷可减小机组尺寸,减轻机组重量。②蒸发量随负荷大小变化,具有明显的自调节能力,绕组温度分布均匀,延长了绝缘寿命。③充分利用冷却介质在液态及气态条件下的重力差或离心力(前者适用于定子,后者适用于转子)作为循环动力,实现了自循环冷却过程。④氟里昂具有良好的绝缘性能和化学惰性,常用氟里昂 113 (三氟三氯乙烷 $\text{CCl}_2\text{F} \cdot \text{CClF}_2$) 还具有不燃、不爆、稳定、无毒、无腐蚀、气化温度低 (47.6°C) 的特点。但也存在结构和运行复杂,以及环境污染等问题。

液态氟里昂从位于上机架附近的冷凝器引出,由定子绕组底部进入导体内部,吸热后气化产生气泡,形成液、气两相混合的流体,其比重小于未气化液体的比重,故在流动压头作用下沿导体向上流动,从定子绕组顶端引出至冷凝器,经二次冷却水冷凝为液体循环使用。对于转子,由于存在离心力的作用,使自循环冷却效果更为显著。

世界各国进行氟里昂冷却研究始于 20 世纪 60 年代初期,苏联、日本、美国、英国不断发表有关研究成果的文献。中国开展氟里昂冷却研究始于 1958 年,1983 年投运了两台 10 MW 氟里昂冷却的水轮发电机,1991 年投运了 1 台 61.8 MV·A 的氟里昂冷却水轮发电机。由于氟里昂介质存在环境污染问题,今后是否进一步推广还有待研究。

(邱景安)

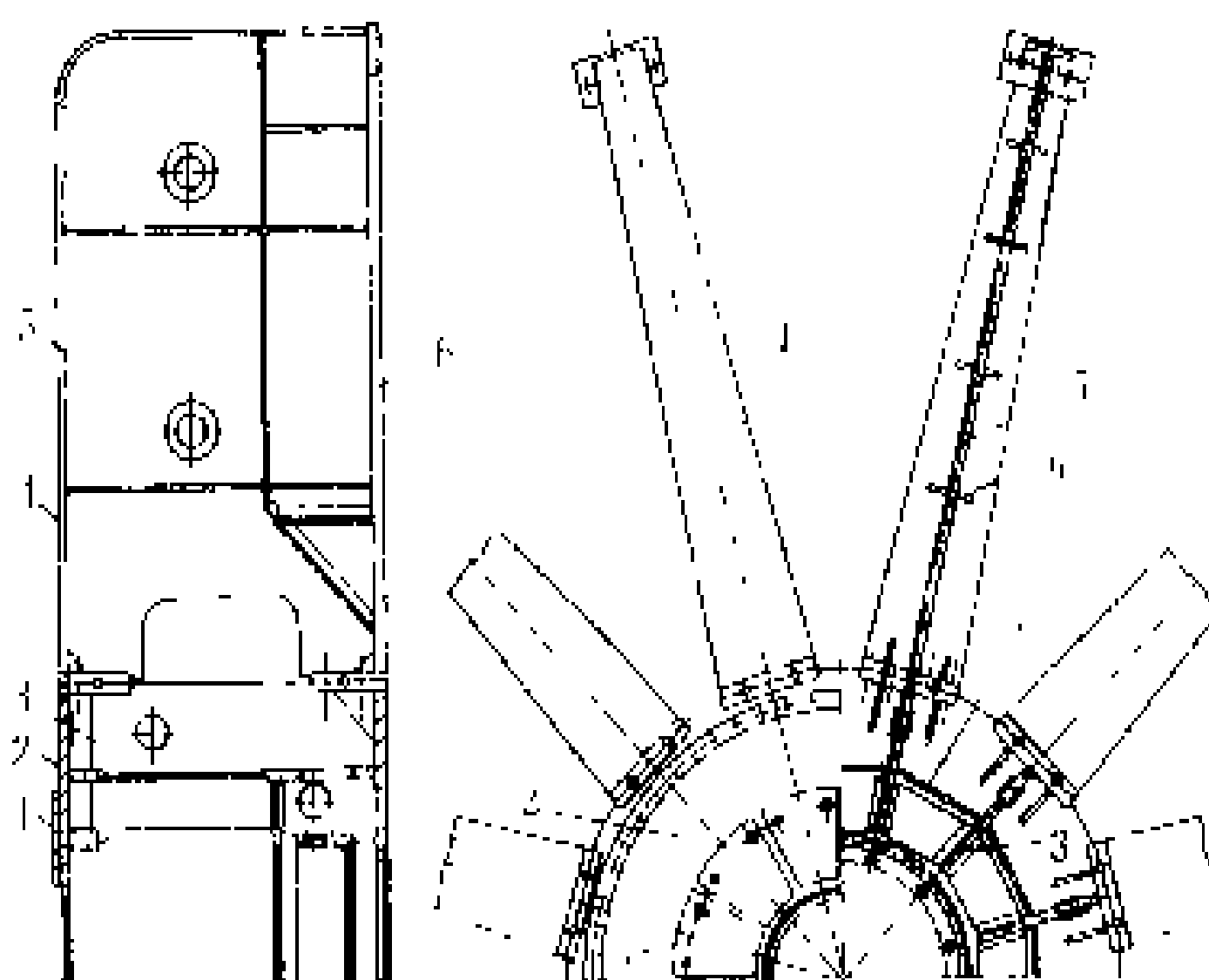
shuilun fadianji jia

水轮发电机机架 (bracket of hydrogenerator)

立式水轮发电机推力轴承、导轴承、制动器、励磁机定子以及转桨式水轮机受油器的支撑部

件。机架一般为钢板焊接结构,主要由中心体和支臂组成,中心体一般为圆盘焊接结构,支臂是由上、下翼板和腹板组装成工字形或盒形截面的焊接结构。中心体和支臂主要根据机组总体结构布置和运输极限尺寸采用直接焊接或采用合缝板连接。合缝板采用圆柱销或凸台止口定位结构,并用螺栓固紧,以保证组合面的紧密性和定位良好。根据承载的性质,机架可分为承重机架和不承重机架两类。装设推力轴承的机架统称为承重机架,在轴向承受转动部分重量、水轮机转轮的轴向水推力以及机架和轴承自身的重量。悬式水轮发电机组的上机架或伞式水轮发电机的下机架即属于承重机架。这类机架多采用受力均匀的辐射形结构。非承重机架主要承受通过导轴承传递的径向力,有的还承受制动器顶起转子时的轴向力和制动时的制动力矩。这类机架多采用并字形、桥型或辐射形结构。为了适应大容量水轮发电机定子铁芯热膨胀引起的变形,有的对上机架也相应采用了适应定子径向变形的结构,如采用斜支臂机架(支臂与中心体斜交)、在支臂与机座连接处装有斜翼板或径向销钉连接机构。

悬式水轮发电机上机架见图示。



悬式水轮发电机上机架

1—加强圈; 2—上圆板; 3—立筋; 4—上翼板; 5—腹板;
6—下翼板; 7—横梁

(邱景安)

shuilun fadianji jiben dianqi canshu

水轮发电机基本电气参数 (basic electrical parameters of hydrogenerator)

水轮发电机基本电气特征值。包括额定容量、额定电压、额定功率因数、短路比、同步电抗、瞬态电抗、超瞬态电抗、负序电抗、零序电抗、时间常数、调相容量、进相容量、充电容量等。

水轮发电机额定容量 额定条件(额定电压、电流及功率因数)下水轮发电机连续输出的千伏·安值。额



定容量等于 $\sqrt{3}$ 倍额定电压与额定电流的乘积即额定视在功率,其单位为 $V \cdot A$ 、 $kV \cdot A$ 或 $MV \cdot A$ 。视在功率与功率因数的乘积称有功功率,其单位为 W 、 kW 或 MW 。在一定的额定转速下,额定容量大致反映了机组几何尺寸的大小。水电站单机的额定容量由电站水头及出力变化特性、枢纽布置、制造能力、供应和运输条件以及电力系统要求等诸因素通过技术经济比较确定。同等条件下应优先考虑单机容量大、机组台数少的方案。

水轮发电机额定电压 水轮发电机端连续输出电压值,是由许多因素综合确定的参数,其单位为 V 或 kV 。该电压反映了水轮发电机的绝缘水平、技术经济指标及对主变压器、发电机电压配电装置的投资及运行费用等的影响。发电机电压越高,绕组的绝缘也增厚,导体的占空系数降低,重量增加,成本加大。但与容量相比,降低电压时,定子绕组匝数减小,电流加大,经济性下降。就机组而言,最合适的端电压大多与定子绕组并联支路数有关,并联支路数是转子极数的约数,应使每支路槽电流得到充分有效的利用。正常情况下,允许发电机额定电压有 $\pm 5\%$ 的变动范围,低于 -5% 额定电压时将导致定子绕组温升增加或定子铁芯长度加长。表 1 为不同机组容量时选择发电机额定电压的参考值。

表 1 选择发电机额定电压的参考值

容 量 (MV · A)	≤20	20~80	70~150	130~300	>300
线电压 (kV)	6.3	10.5	13.8	15.75	>18

国外水轮发电机额定电压最高已达 23 kV。

水轮发电机额定功率因数 表明发电机额定有功功率与额定容量的比值。当额定有功功率一定时,提高额定功率因数可以提高发电机有效材料的利用率,提高发电机的效率,减轻发电机的重量,降低造价,但电抗值增大,惯性时间常数减小,稳定性降低。由于水电站一般远离负荷中心,选择额定功率因数时应考虑大量无功功率能送出,也应对降低送端功率因数还是装补偿设备的合理性进行比较。当采用远距离直流输电时,还应考虑整流设备消耗的无功功率,宜降低机组的额定功率因数。因此水轮发电机的额定功率因数应在综合考虑上列影响因素的基础上优选确定。中国制造的水轮发电机的额定功率因数与额定容量的大致关系见表 2。

近年来,超高压远距离输电使线路对地电容增大和采取快速励磁使大容量水轮发电机的额定功率因数

表 2 中国机组额定功率因数与额定容量大致关系表

额定容量(MV · A)	10~60	20~170	110~300
额定功率因数	0.8	0.85	0.875

有提高的趋势。国外大容量水轮发电机的额定功率因数最高达 0.975。

短路比 空载额定电压时的励磁电流与三相稳态短路电流为额定值时的励磁电流之比。通常短路比越大,静态稳定极限就越高,电压变化率越小。在一定励磁容量下,增大短路比,增大了发电机的空载磁动势,减小了电枢反应磁动势,减小了发电机的调相容量,而在充电运行时提高了充电容量。另一方面,增大短路比将使发电机转子用钢量增多,增加成本。水轮发电机的短路比一般为 1.0 左右,最高可达 1.5,最低可达 0.67。

同步电抗 正常稳定运行时发电机呈现的电抗。分直轴与交轴两类:直轴呈现的电抗称直轴同步电抗,以 x_d 表示;交轴呈现的电抗称交轴同步电抗,以 x_q 表示。由于水轮发电机转子磁极为凸极结构,直轴参数为常用。如不计饱和,直轴同步电抗与短路比互为倒数。在电磁负荷已定条件下,直轴同步电抗主要取决于气隙长度。气隙越长,短路比越大,直轴同步电抗越小。直轴同步电抗决定了发电机最大输出功率或静态稳定极限,其值越小,静态稳定极限越高,电压变化率越小。直轴同步电抗的不饱和值一般为 0.7~1.3 (标么值)。正常运行时发电机处在饱和状态,直轴同步电抗的饱和值比不饱和值约减小 20%~30%,但在进相或充电运行时发电机处在欠励磁运行,直轴同步电抗应取不饱和值。

瞬态电抗 发电机端部突然三相短路时,阻尼绕组产生的自由电流衰减后呈现的电抗。直轴呈现的电抗称直轴瞬态电抗,以 x_d' 表示;交轴呈现的电抗称交轴瞬态电抗,以 x_q' 表示。在电磁负荷确定的条件下,直轴瞬态电抗主要由定子绕组和励磁绕组的漏抗值决定, x_d' 的变化对发电机动态稳定极限及突然加负荷时的瞬态电压变化率有重大影响,减小 x_d' 可以提高动态稳定储备系数。减小 x_d' 主要是减小电负荷,即要增加定子铁芯长度或直径,提高了机组造价 (大致与 $1/\sqrt{x_d'}$ 成比例)。对水内冷的大容量发电机,由于电负荷大大提高,为避免 x_d' 过大,在机组结构设计时应尽量降低定子绕组和励磁绕组的漏抗。普通空气冷却水轮发电机 x_d' 不饱和值为 0.24~0.38,水内冷水轮发电机大于 0.4,饱和值约为不饱和值的 0.9 倍。

超瞬态电抗 有阻尼绕组的发电机在突然短路的初瞬间 ($t=0$) 呈现的电抗。直轴呈现的电抗称直轴超瞬态电抗,以 x_d'' 表示;交轴呈现的电抗称交轴超瞬态

电抗,以 x_q'' 表示。 x_d'' 值取决于阻尼绕组的结构型式及定子绕组的漏抗,并近似等于阻尼绕组漏抗与定子绕组漏抗之和。它是计算短路电流的重要数据,对选择电站电气设备有重要影响。 x_d'' 值越小,短路冲击电流值越大,作用于绕组端部上的力越大。 x_d'' 还对发电机的异步力矩略有影响。由于阻尼绕组的漏抗值很小,故改变 x_d'' 值比改变 x_d' 值更困难。中国制造的水轮发电机的 x_d'' 不饱和值大致为0.16~0.26,饱和值约为不饱和值的0.85倍。

水轮发电机负序电抗 当转子正常同步旋转,励磁绕组短路,电枢绕组加上一组对称的负序电压时,负序电枢电流所遇到的电抗,以 x_2 表示。由于负序旋转磁场与转子有两倍同步转速的相对运动,随着转子相对位置的变化,负序电抗值将在 x_d'' 及 x_q'' 之间变化。 x_2 值还与外接电抗大小有关,当外接大电抗时 $x_2 \approx \frac{1}{2} \times (x_d'' + x_q'')$,当外接电抗为零时(机端短路) $x_2 = \sqrt{x_d'' x_q''}$ 。中国制造的水轮发电机的负序电抗范围为0.161~0.27。

水轮发电机零序电抗 当转子正向同步旋转,励磁绕组短路,电枢通过的零序电流所遇到的电抗,以 x_0 表示。零序电流在电枢绕组只能产生漏磁通和三次谐波气隙磁通。由于三次谐波气隙磁通值不大,故 x_0 具有漏电抗的性质,并与主磁路饱和程度无关。中国制造的水轮发电机的零序电抗值为0.049~0.123。

定子非周期分量衰减时间常数 反映定子绕组出线端短路时,短路电流非周期分量的衰减特性,其值等于负序电抗与定子绕组电阻之比,是短路电流计算的重要参数之一,以 T_a 表示,单位为s。大容量机组由于定子绕组电流大,线棒截面大,并联支路数多,其 T_a 值比小容量机组的 T_a 值要大。中国制造的水轮发电机 T_a 值范围为0.08~0.33s。

直轴瞬态电流衰减时间常数 定子绕组短路及无阻尼绕组时励磁绕组的时间常数,反映了定子绕组出线端短路时瞬态阶段短路电流周期分量的衰减特性,以 T_d' 表示,单位为s。中国制造的水轮发电机的 T_d' 值范围为1~3s。

直轴超瞬态电流衰减时间常数 定子绕组及励磁绕组均短路时直轴阻尼绕组的时间常数,反映了定子绕组出线端短路时超瞬态阶段短路电流周期分量的衰减特性,以 T_d'' 表示,单位为s。中国制造的水轮发电机 T_d'' 值的大致范围为0.02~0.10s。

水轮发电机调相容量 机组作同步电动机运行, $\cos\varphi=0$,励磁电流为额定值时可能发出的感性无功容量,其单位为kvar。水轮发电机调相运行时,将消耗电力系统一部分有功功率用于补偿机组的铜耗、铁耗

和风摩擦损耗等,向电力系统输送感性无功功率,以改善电力系统的功率因数。为了减小损耗,通常用压缩空气将水轮机转轮室中的水面压低,使转轮在空气中转动。水轮发电机调相运行时的容量的大小与它的额定功率因数和短路比有关:额定功率因数愈低,则调相容量愈大;在一定的额定功率因数时,短路比小,调相容量大。通常水轮发电机的调相容量范围为额定容量的0.65~0.8倍。

水轮发电机进相容量 水轮发电机在送出有功功率的同时,在欠励状态下可能吸收的最大感性无功容量,其单位为kvar。水轮发电机的进相运行主要为了满足电力系统中电压水平或无功功率平衡的需要。进相运行时定子端部漏磁和由漏磁引起的损耗要比调相运行时增加,所以定子端部附近金属件温度将升高。另一方面,进相运行时由于电动势及电压降低,输送同样有功功率时功率角要增加,容易引起机组失步。

水轮发电机充电容量 水轮发电机端电压为额定值时带空载高压线路状态下,机组可能吸收的最大感性无功容量,其单位为kvar。水轮发电机的最大充电容量 Q_{\max} 可按式确定

$$Q_{\max} = \left(1 - \frac{U_{\min}}{I_0 R_f} \right) \frac{S_n}{x_d}$$

式中 U_{\min} 为最低励磁电压,V; I_0 为发电机空载励磁电流,A; R_f 为励磁绕组15℃时的电阻,Ω; S_n 为发电机额定容量,kV·A; x_d 为直轴同步电抗。

(邱景安)

shuilun fadianji jichu

水轮发电机基础 (foundation of hydro-generator)

承受水轮发电机重量及扭矩的钢筋混凝土结构。立式水轮发电机静止部分的垂直荷重和扭矩主要通过定子基础板和固定螺杆传至混凝土基础。转动部分的重量和水推力对悬式水轮发电机也是通过定子基础板和固定螺杆传至基础;对伞式水轮发电机则通过下机架传至基础。此外,为了减小水轮发电机的径向振动,常在上机架(或下机架)支臂外端装设承受径向力的千斤顶,千斤顶的另一端接触在发电机机坑壁混凝土上。定子基础件包括基础板、楔形板、螺栓、销钉及基础螺杆等。基础板一般采用铸造结构,上、下端面经加工而成,也可采用厚钢板组焊结构。楔形板由上、下两块组成,斜度为1:50用以调整定子水平面和高程。楔形板由厚钢板加工而成,两块楔形板对称放置在基础板下部,楔形板下面与混凝土基础之间铺以垫板,以使基础压应力均匀分布在混凝土基础面上。然后用埋设在混凝土基础面内的基础螺杆压紧。为使安装准确,在机组定子机座与基础板之间用销钉定位。



作用于机墩的荷载有：①垂直恒荷载 P_c ，包括机墩自重、风洞钢筋混凝土自重、发电机层楼板荷载及水轮发电机本体静止部分重量。②垂直集中动荷载 P_d ，包括机组转动部分重量；③扭矩，包括正常运行时电磁感应产生的扭矩 M_t 和短路时产生的短路扭矩 M_t' ；④水平集中动荷载，包括水平离心力和切向水平力，水平离心力是由于转动部分偏心矩所引起，正常运行时为 P_m ，飞逸时为 P_{mp} ；切向水平力是由正常扭矩或短路扭矩通过定子基础螺杆产生的，正常时为 P_n ，短路时为 P_n' ；⑤地震产生的附加力 P_e ；⑥机座的温度应力 P_t 。上述荷载除机墩自重、风洞钢筋混凝土自重和发电机层楼板荷载由厂房结构计算确定外，其余荷载值均应由发电机制造厂提供。荷载组合条件如下：正常运行时计算荷载 $= P_c + P_d + M_t + P_m + P_n + P_e + P_t$ ；短路时计算荷载 $= P_c + P_d + M_t + M_t' + P_m + P_n' + P_t$ ；飞逸时计算荷载 $= P_c + P_d + P_{mp} + P_t$ 。

(邱景安)

shuilun fadianji jidian baohu

水轮发电机继电保护 (relay protection of hydrogenerator) 检测发电机电气部分不正常运行工况或故障并发出警告信号或有选择地向断路器发出跳闸或停机等操作指令，以终止故障发展的自动化技术及装置。针对故障和不正常运行的类型，水轮发电机一般装有纵联差动保护，定子绕组匝间短路保护，定子绕组接地保护，转子回路一点接地保护，失励磁保护，过电压保护，过负荷保护，调相运行时失去电源的解列保护等等。上述保护，各自反应某一种故障或不正常运行状态，难以相互代替。另外，装设过电流保护，作为纵联差动保护拒动以及与发电机相邻接的电气设备故障的后备保护。各种保护配置示意图见图1。保护继电器可分为机电型、整流型、晶体管 and 集成电路型。

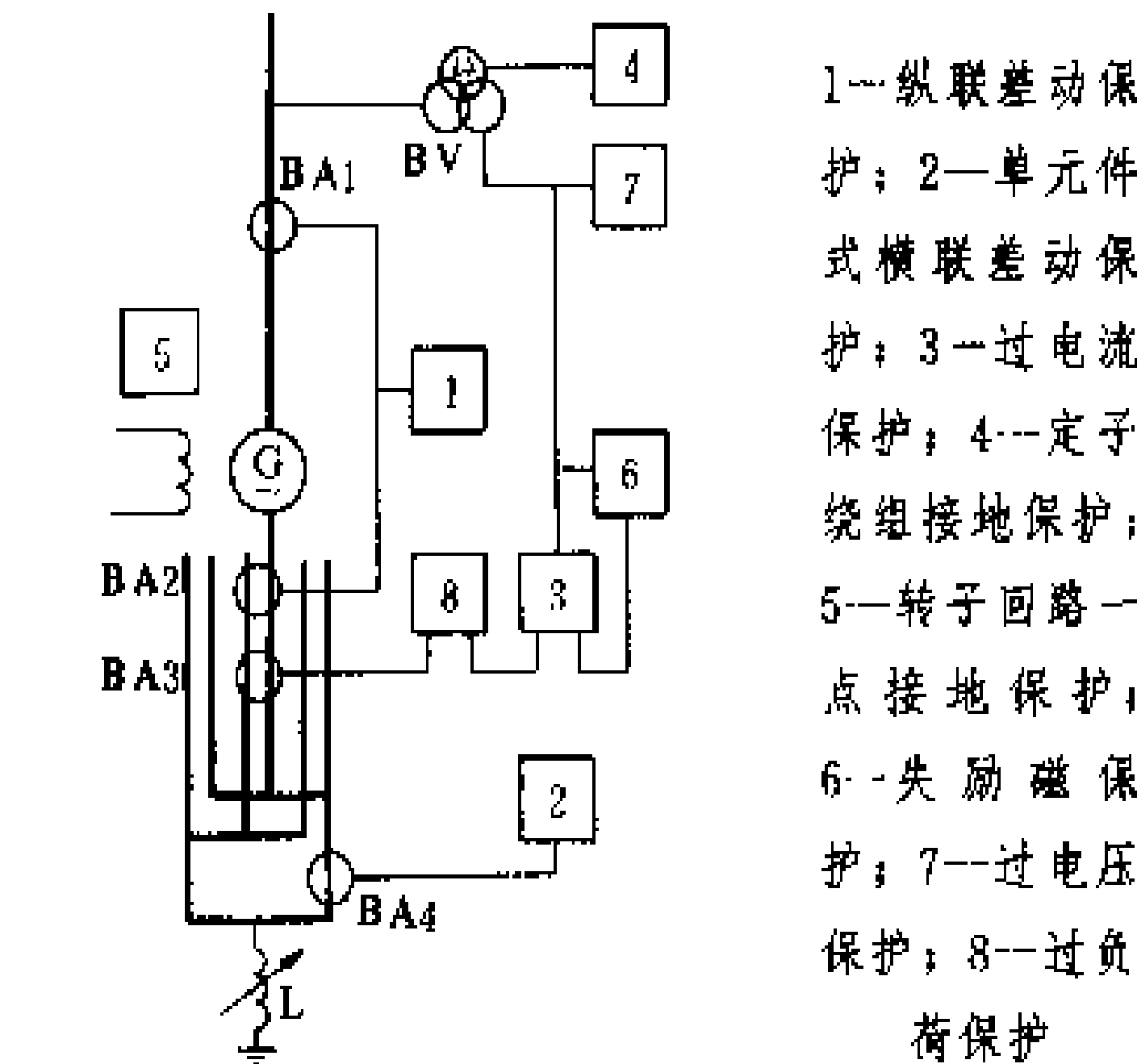


图1 保护配置示意图

也可采用微型继电保护装置。

纵联差动保护 定子绕组相间短路故障的主要保护，由差动继电器组成，瞬时动作于停机、灭磁和断路器跳闸。接入差动继电器的电流是发电机中性点引出线和机端引出线两侧相同各相的差电流，故称纵联差动保护。差动继电器按其构成原理，可分为带有速饱和变流器的差动继电器和比例制动式差动继电器，可以做机电型、整流型或晶体管型等。带有速饱和变流器的差动继电器是利用速饱和变流器通过非周期电流时的饱和特性，使继电器在机组保护区外部故障、流入非周期故障电流时不动作；在内部故障时，机端引出线侧电流方向改变，流入差动继电器的电流为故障电流之和，其周期故障电流使继电器动作。比例制动式纵联差动保护原理接线和制动特性如图2(a)和图2(b)所示。差动继电器具有一个差动线圈 W_d ，两个制动线圈 W_{b1} 和 W_{b2} ， W_{b1} 与 W_{b2} 匝数相等，且为 W_d 匝数的二分之一。当保护区外部短路故障时， I_1 和 I_2 同方向（图中实线所示）， i_d 为不平衡电流，数值很小，流过制动线圈的电流 i_{b1} 和 i_{b2} 方向相同，制动分量为短路电流的和电流，制动量增大，继电器不动作，即工作点落到图2(b)制动特性 abe 下面的制动区。当内部短路故障时， I_2 改变方向（如图中虚线所示）， i_d 变为短路电流的和电流，动作量增大，制动量变成短路电流差电流，制动量大大减小，工作点落在动作区，继电器动作。图2(b)中， i_d 为继电器动作电流，制动特性 abe 是一折线， oa 代表当制动电流为零时继电器的最小动作电流， ab 段是不需具有比例制动特性段（取制动电流为额定电流确定 c 和 b 点）， be 段是具有比例制动特性段。虚线 og 表示在不同的外部短路电流作用下差动回路不平衡电流值的变化，只要满足 ef 段大于 gf 段，在各种外部短路情况下继电器就不会误动作了。通常 oa 段可取 $(0.1 \sim 0.2)$ 倍额定电流，因而可大大提高保护的灵敏性。

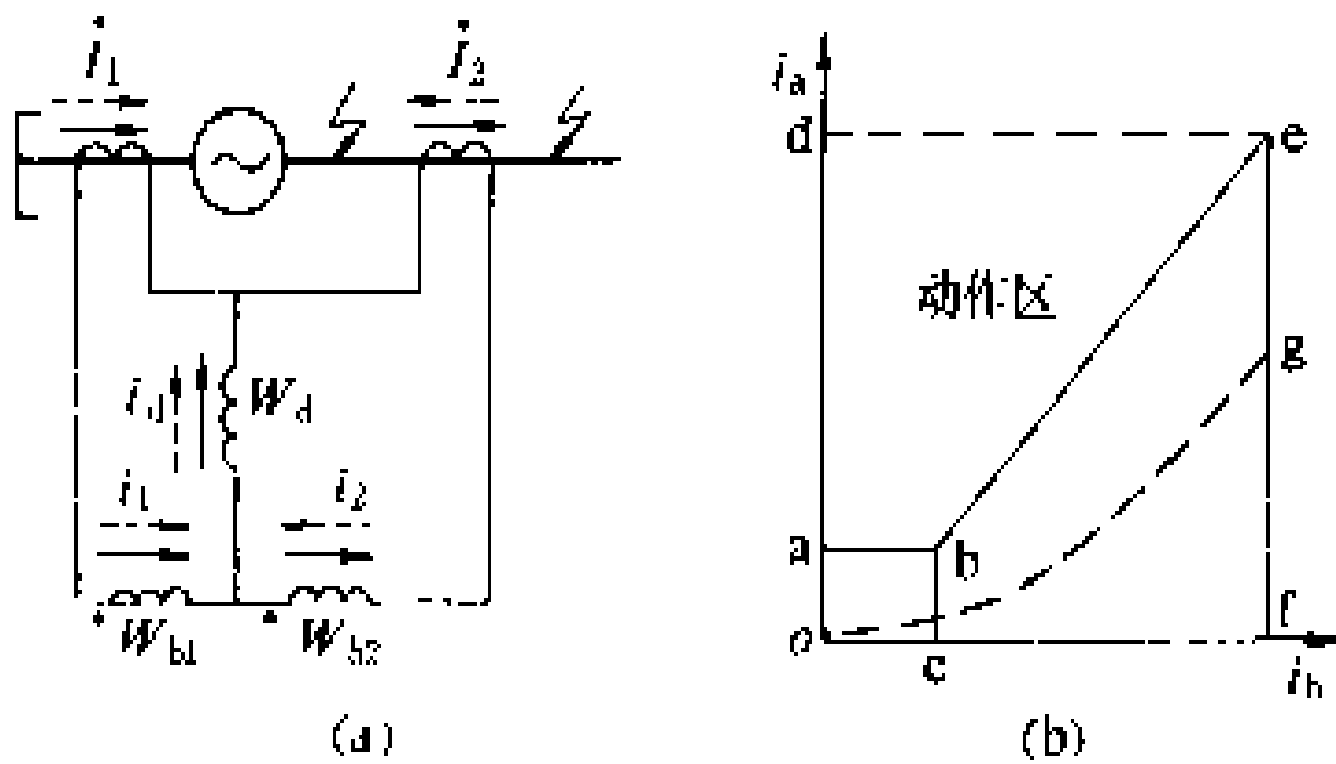


图2 比例制动式纵联差动保护原理

接线和制动特性

(a) 原理接线；(b) 制动特性

定子绕组匝间短路保护 该保护是定子绕组匝间短路故障的主要保护，瞬时动作于停机、灭磁和断路器

跳闸。对于定子绕组为星形接线、每相有并联分支，且中性点有分支引出端子的发电机，可采用比较两个星形绕组三相电流之和的单元件式横联差动保护作为定子绕组匝间短路保护，即在两个星形接线中性点连接线上，接入一个电流互感器，再在其二次侧接一个带

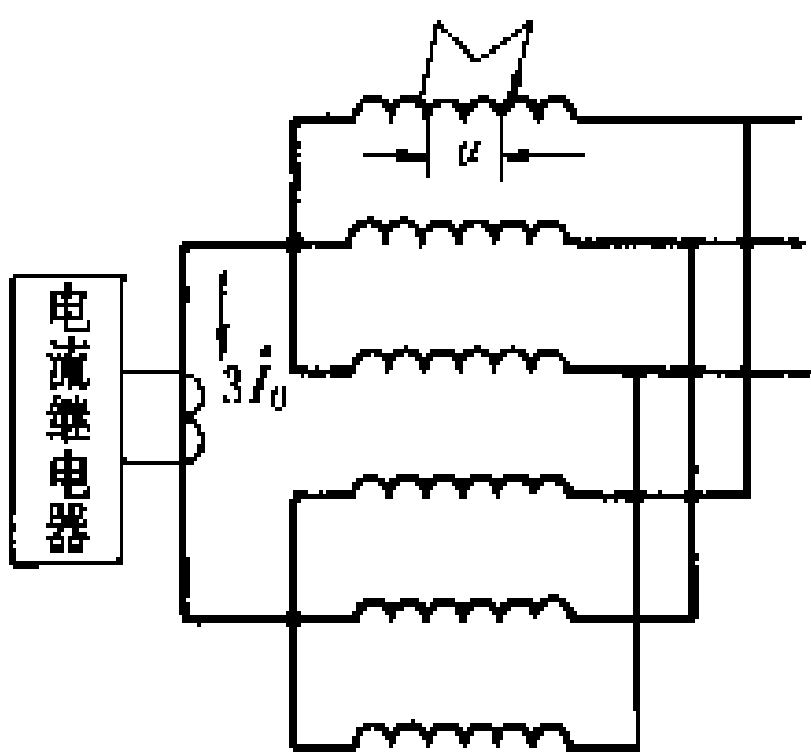


图 3 单元件式横联差动保护原理图

三次谐波滤波器的电流继电器，如图 3 所示。正常运行时定子绕组三相平衡，中性点连接线上仅通过不大的不平衡电流，保护不动作。当发生匝间短路时，三相电动势不平衡而导致中性点连接线上有故障不平衡电流 $3I_0$ 流过，保护动作。

对定子绕组为星形接线、中性点只有三个引出端子的发电机，特别是大型发电机，应采用其他原理构成的专用匝间短路保护。当发电机定子绕组发生匝间短路时，将会出现故障特征参量：一是出现定子负序电流和负序电压，而定子负序电流又会在转子绕组中感应出二次谐波电流，此电流当机组正常运行时在理论上是不存在的；二是出现负序功率，此负序功率在机组内部故障时是由发电机流向系统的，而当外部故障时则是由系统流向发电机，因而用负序功率的方向性区别保护区内部和外部故障；三是出现零序电压，这是由于匝间短路后，三相一次电压对称条件被破坏而出现的。根据这些故障特征参量可构成负序功率方向闭锁的转子二次谐波电流匝间短路保护、负序功率方向闭锁的定子零序电压匝间短路保护等。

多分支“分布中性点”接线方式定子绕组短路保护 为解决大型水轮发电机中性点引出线的发热问题，可以做成每相多分支并联的定子绕组，每一分支的三相接成星形，其中性点汇集于中性铜环，再由中性铜环引中性线到机外，由于此时中性引出线的电流理论上为零，从而从根本上解决了中性点引出线发热的问题。图 4(a) 为 6 分支并联的三相定子绕组的接线方式，但这种接线使通常的发电机纵联差动保护和单元件式横联差动保护不能采用了。图 4(b) 为 6 分支“分布中性点”接线方式定子绕组保护系统的二次交流回路（一相），每一定子绕组的分支，配置一个电流互感器（BA1~BA6），6 个分支电流互感器分成两组（1、3、5 和 2、4、6 各一组，二次绕组并联后接入继电器 K1，构成匝间短路保护。发电机端出线每相装有电流互感器（BA7），它的二次电流与一组分支电流互感器（如 1、3、5）的二次电流构成纵联差动保护的两侧电流，接入

继电器 K2，构成相间短路保护。

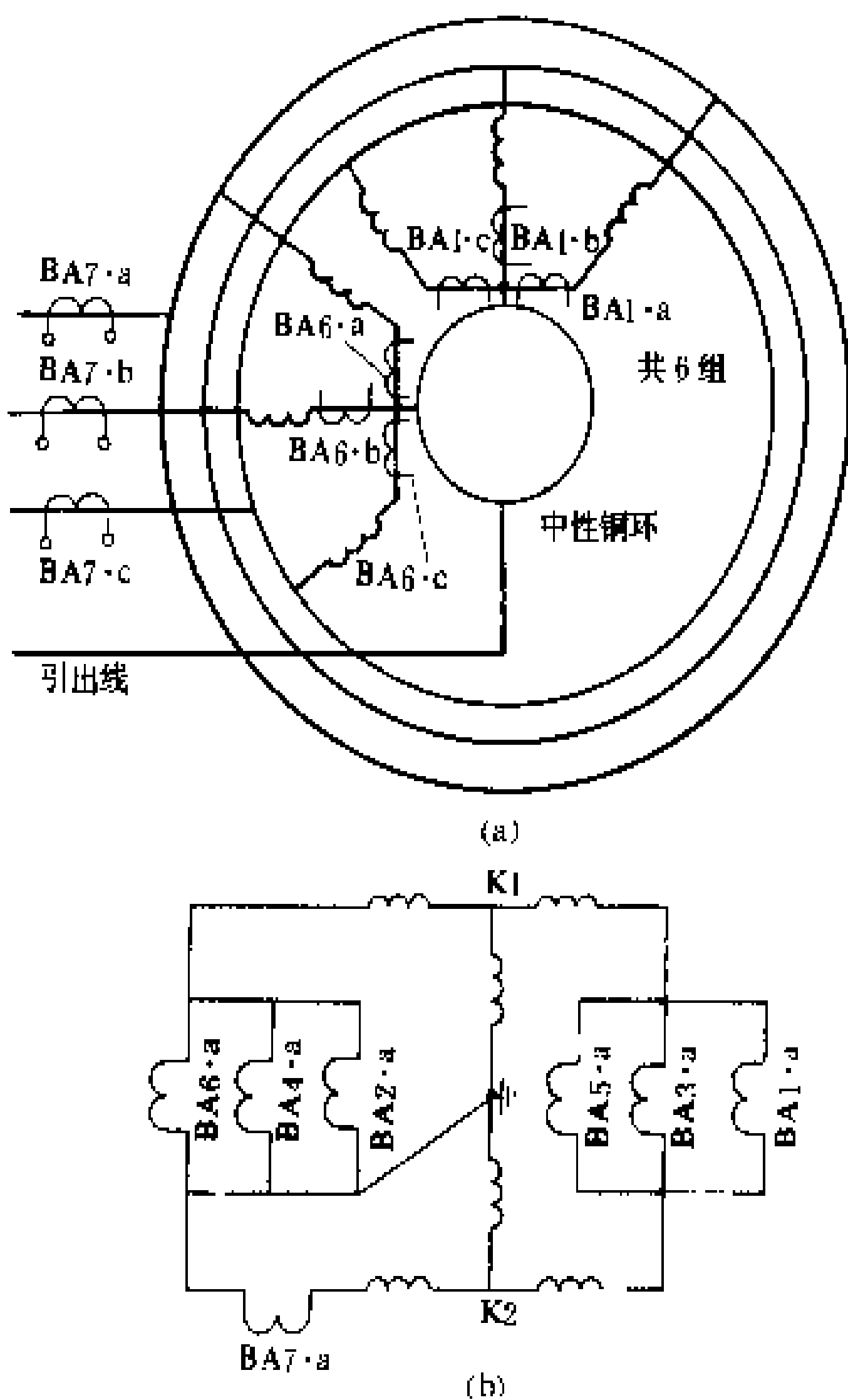


图 4 6 分支“分布中性点”接线方式
(a) 发电机定子绕组接线；(b) 保护系统的二次交流回路（一相）

过电流保护 作为相间短路故障的后备保护，延时动作于灭磁和断路器跳闸但不停机。根据短路故障时电流增大、电压下降或出现负序分量等特征，可构成各种类型的过电流保护：①仅反应故障电流的过电流保护。②低电压起动的过电流保护，电压降低和电流增大同时出现时保护动作。③反应负序电压增大、正序电压降低、电流增大的带复合电压起动的过电流保护，负序电压元件增大了不对称短路故障时的灵敏性。④负序过电流加单元件低电压起动的过电流保护，可以同时满足不对称和对称短路故障灵敏性的要求。⑤对于采用自并励励磁方式的发电机，为考虑短路电流衰减所产生的影响，防止后备保护拒动，可采用低电压启动、电流自保持的过电流保护（也可采用精确工作电流足够小的低阻抗保护）等。

定子绕组接地保护 定子绕组接地保护的范围，包括定子绕组和发电机电压的引出线，主要是针对单相接地。其保护方式与正常定子中性点接地方式有关，正常定子中性点接地方式主要有：①中性点不接地或经单相电压互感器接地；②中性点经配电变压器接地；③中性点经消弧线圈接地；④经低阻抗接地。根据定子绕组接地时的故障电量，可以采用基波零序电压型保



护、三次谐波电压型保护以及外加电源方式的保护等。当单相接地故障电流小于或补偿到安全电流以下时，保护动作后只发信号。

转子回路一点接地保护 水轮发电机不允许转子回路带接地故障长时间运行，但允许机组转移负荷后才停机处理，故保护动作后发信号。转子回路一点接地保护可采用叠加直流电压式、叠加交流电压式、测量转子绕组对地导纳等原理的保护。

失励磁保护 水轮发电机失去励磁后，由于其同步电抗较小，从系统吸收的无功功率较大，引起系统电压下降；水轮发电机异步运行时所需的转差率较大，引起定子绕组和转子绕组附加温升；纵轴和横轴磁路不对称，使得其转矩发生剧烈周期性变化。因此，水轮发电机不允许无励磁运行。失励磁且过渡到异步运行后，定子电流增大，定子电压和系统电压下降，有功功率输出减小，无功功率反向，转子回路中出现差频电流等，根据这些电气量的变化，可以由判别异步边界和静态边界的阻抗元件、判别电力系统电压三相同步下降的低电压元件、防止误动作的闭锁元件以及延时元件等组成失励磁保护。保护动作于灭磁和断路器跳闸但不停机。

过电压保护 机组甩负荷后，转速突然上升，定子电压突然升高，危及机组绝缘，为此装设过电压保护。该保护由过电压继电器和时间继电器构成，延时动作于灭磁和断路器跳闸，一般不停机。

过负荷保护 包括对称和不对称(负序)过负荷保护两类，由电流继电器和时间继电器构成，延时动作于信号。

发电机变压器组继电保护 发电机经变压器直接接至高压母线时，称为发电机变压器组单元接线。在单独的发电机和单独的变压器上各自可能出现的故障和不正常运行状态，也都有可能在单元接线组上出现，故应装设发电机变压器组继电保护。该保护装置应包括能反应变压器的高压侧单相接地零序保护、内部故障的气体保护、过励磁保护等，发电机的定子绕组匝间短路保护、过电压保护、转子回路一点接地保护、失励磁保护等。同时，对纵联差动保护、定子绕组接地保护、过负荷保护，根据单元接线不同情况，有不同考虑。①对纵联差动保护，当发电机与变压器之间有断路器时各自装设纵联差动保护，无断路器时一般只装设一组包括发电机和变压器在内的共用的纵联差动保护，对大型机组则在发电机上增设单独的纵联差动保护。②对于发电机电压侧单相接地保护，当发电机与变压器之间有断路器时该保护装置应接在变压器低压侧的电压互感器上，无断路器时应接在发电机的电压互感器上。③对后备保护、过负荷保护，若为发电机双绕组变压器

组可装设全组共用的保护；若为发电机三绕组变压器组等其他接线方式，则要考虑这些保护的特点，例如装设单独的保护、保护带方向元件等。(见继电保护)

参考书目

王维俭，侯炳蘼编著，大型机组继电保护理论基础，第二版，北京：水利电力出版社，1989

(贺至刚)

shuilun fadianji jueyuandengji

水轮发电机绝缘等级 (insulation class of hydrogenerator)

水轮发电机绝缘强度的级别。电机绝缘包括股间、层间、排间、匝间和对地绝缘，端部各种支撑或固定用的绝缘构件以及连接线和引出线绝缘。在长期运行过程中，由于受到电、热、机械力的作用和不同环境条件的影响，使绕组绝缘逐渐老化，因此绕组绝缘应具有产品所要求的耐热等级，足够的耐电强度，优良的机械性能和良好的工艺。

耐热等级 电机常用绝缘结构分 A、E、B、F、H 五个耐热等级，相应的允许最热点温度见表。由于运行中电机绕组实测温度不完全反映最热点温度，且绕组绝缘的寿命随温度升高而呈指数下降，故在电机设计时通常留有 5~10℃ 的裕度，以保证绝缘寿命。

绕组绝缘的耐热等级及其允许温度

耐热等级	A	E	B	F	H
最热点温度 (℃)	105	120	130	155	180

耐电强度 机组运行中除受到正常工作电压长期作用外，有时还受到大气过电压和内部过电压的瞬时作用，因此设计时绝缘的击穿电压应比额定电压高 5~11 倍以上。

为了检查绝缘结构的缺陷，在制造过程中要进行多次工频耐压试验。每进行一次就会在结构中产生一定的细微劣化痕迹，使其电气强度有所下降，下降强度与外施电场强弱及其作用时间有关，此即所谓积累效应。由于绝缘内部电离放电量是与频率成正比的，因此采用超低频(如 0.1Hz)或直流耐压试验，对绝缘耐电性能的影响要小得多。

机械性能 发电机在自同步合闸或突然短路时，都会产生强大的冲击短路电流，使定子绕组槽部和端部受到强大电动力作用，因此要求绕组绝缘具有一定的机械强度，能够承受一定的机械应力。机组起停频繁和负荷剧烈变化，使导体和绝缘产生热应力，也会使绝缘变形及损伤，因此还要求绝缘具有一定的弹性和强度。

(邱景安)

shuilun fadianji kongqi lengque

水轮发电机空气冷却 (air cooling of hydrogenerator)

利用空气作为冷却介质,对水轮发电机定子、转子绕组及定子铁芯表面进行冷却,是水轮发电机的主要冷却方式。根据发电机的容量和损耗值以及转子产生的风压,水轮发电机的空气冷却可以采用开启式、管道式或密封自循环式。

开启式通风 利用发电机周围环境空气自流冷却,具有结构简单、安装方便的优点。由于受环境影响大,故防潮、防尘性能差,散热量也有限,适用于额定容量 1000 kV·A 及以下的水轮发电机。

管道式通风 冷空气一般取自温度较低的水轮机室,靠电机自身的风压将热空气经风道排至厂外,借助风道高差的拔风作用,散热能力在相同条件下比开启式通风略有增加,适用于 1000~4000 kV·A 的水轮发电机。为防止尘土进入发电机内,可在进风口设置滤尘器。

密闭自循环式通风 发电机四周密闭形成自循环的通路,通过空气冷却器进行热交换的冷却方式。该方式具有冷却空气干燥、清洁、冷风稳定、散热量大等优点,适用于 4000 kV·A 及以上的立式水轮发电机。按通风路径特点,密闭自循环式通风可以分为双路径向,双路轴向、单路径向、单路轴向等几类。常用的是双路径向通风系统,通过空气冷却器分上、下两路,上路经上机架支臂之间的空间,下路经基础混凝土预留风道进入转子支架,在转子支臂离心风压及磁轭两端的风扇压头作用下,大部分通过磁轭风沟、磁极极间空间和定转子间空气隙流经定子通风沟,少部分流经定子端部绕组和齿压板间隙,然后汇集定子机座的冷却器窗孔进入空气冷却器,完成自循环过程。空气冷却器由多排并联的冷却水管和上、下水箱等主要零部件组成,大、中容量水轮发电机一般装设 8 个或 12 个冷却器,各个冷却器通过阀门以并联连接至环形进出水管上。这样,当任一个冷却器发生故障或检修退出运行时,可单独关闭,而不影响其它冷却器的正常运行。当转子产生的风压不足以补偿风道的风阻时,可在转子的上、下端设转桨式风扇,或装设由电动机传动的轴流风扇,后者多用于灯泡式水轮发电机或高速大容量的发电电动机。

(邱景安)

shuilun fadianji li

水轮发电机励磁 (hydrogenerator excitation)

给水轮发电机转子绕组提供电流以建立磁场的技术及设施。通常均采用直流电流建立磁场;而对抽水蓄能机组采用变转速发电电动机时,也有采用低频三相交流电流,建立转子旋转磁场,此时转于绕组

是三相式绕组。励磁的主要作用是:①维持单机正常运行状态下发电机的电压在规定的水平上。②在多台机组并列正常运行状态下,稳定地分配发电机间的无功功率。③维持发电机在正常运行状态时受到电力系统负荷变化的扰动下的电力系统稳定运行。④电力系统发生故障导致发电机电压严重下降时,提供强行励磁,以提高电力系统的运行暂态稳定性。励磁系统由两个基本环节构成:第一部分是励磁功率单元,用以供给发电机励磁电流;第二部分是励磁调节器,根据机组各种运行工况的需要,自动调节功率部分供给的励磁电流。以下主要介绍采用直流电流进行励磁的情况,其示意框图如图 1 所示,图中 G 为发电机, u_G 为发电机电压, I_{fd} 为励磁电流, U_{fd} 为励磁电压。按照提供励磁功率电源的不同,可分为直流电机励磁系统和整流器励磁系统两大类。前者由与发电机同轴的直流发电机向转子绕组直接供给励磁电流,后者的励磁电流则是由交流电源经整流器变换成直流后提供的。直流电机励磁系统是使用最早的励磁方式,随着电力系统的发展,单机容量的增大,超高压远距离输电线路的增多,要求励磁系统具有快速调节和高的励磁顶值电压的性能,以满足电力系统稳定性的要求,这对具有较大时间常数的直流电机励磁系统是难以实现的。在 20 世纪 50~60 年代,有一些大型水轮发电机,曾采用离子整流器(汞弧整流器、引燃管等)励磁系统,这种励磁系统虽然能满足上述要求,但由于设备占地面积大、控制线路复杂、运行和维护不便,没有得到推广。70 年代随着大功率晶闸管整流器制造技术和应用的发展,在技术上和经济上都达到了广泛用于工业上的水平,因而在现代大型同步发电机上,晶闸管整流器快速励磁系统已取代了直流电机励磁系统和离子励磁系统。

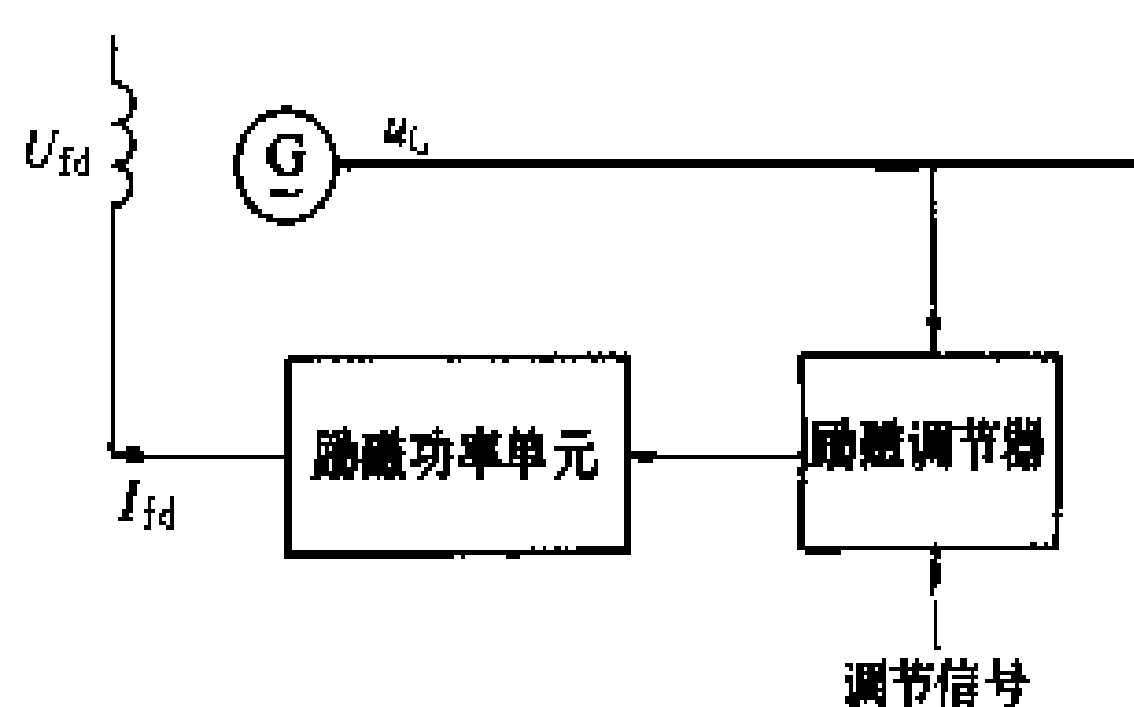


图 1 励磁系统示意框图

直流电机励磁系统 根据供给和调节直流励磁机励磁电流方式的不同,可分为连续调节型和开关调节型两种,多用于中小型机组。

连续调节型直流电机励磁系统 发电机励磁电流的调节,是根据发电机运行工况的需要,通过连续调节直流励磁机的励磁电流,改变励磁机的输出电压,从而改变发电机转子绕组电流而实现的。当直流励磁机为自并励接线,励磁机的励磁电流由本身的自励回路和



自动励磁调节器 (Automatic Voltage Regulator, AVR) 共同供给, 改变励磁机的输出即可相应地改变发电机的励磁电流, 如图 2 (a) 所示。当励磁机为他励接线, 由同轴交流励磁机经晶闸管整流器, 由 AVR 控制其输出电流来改变直流励磁机的输出电压, 从而改变发电机的励磁电流, 如图 2 (b) 所示。

开关调节型直流电机励磁系统 接线方式如图 2 (c) 所示, 在励磁机励磁回路中, 串接工作于直流开关状态的晶闸管整流器, 通过 AVR 调节该直流开关导通时间的长短 (脉冲宽度) 或导通次数的多少 (脉冲频率) 来控制励磁电流。

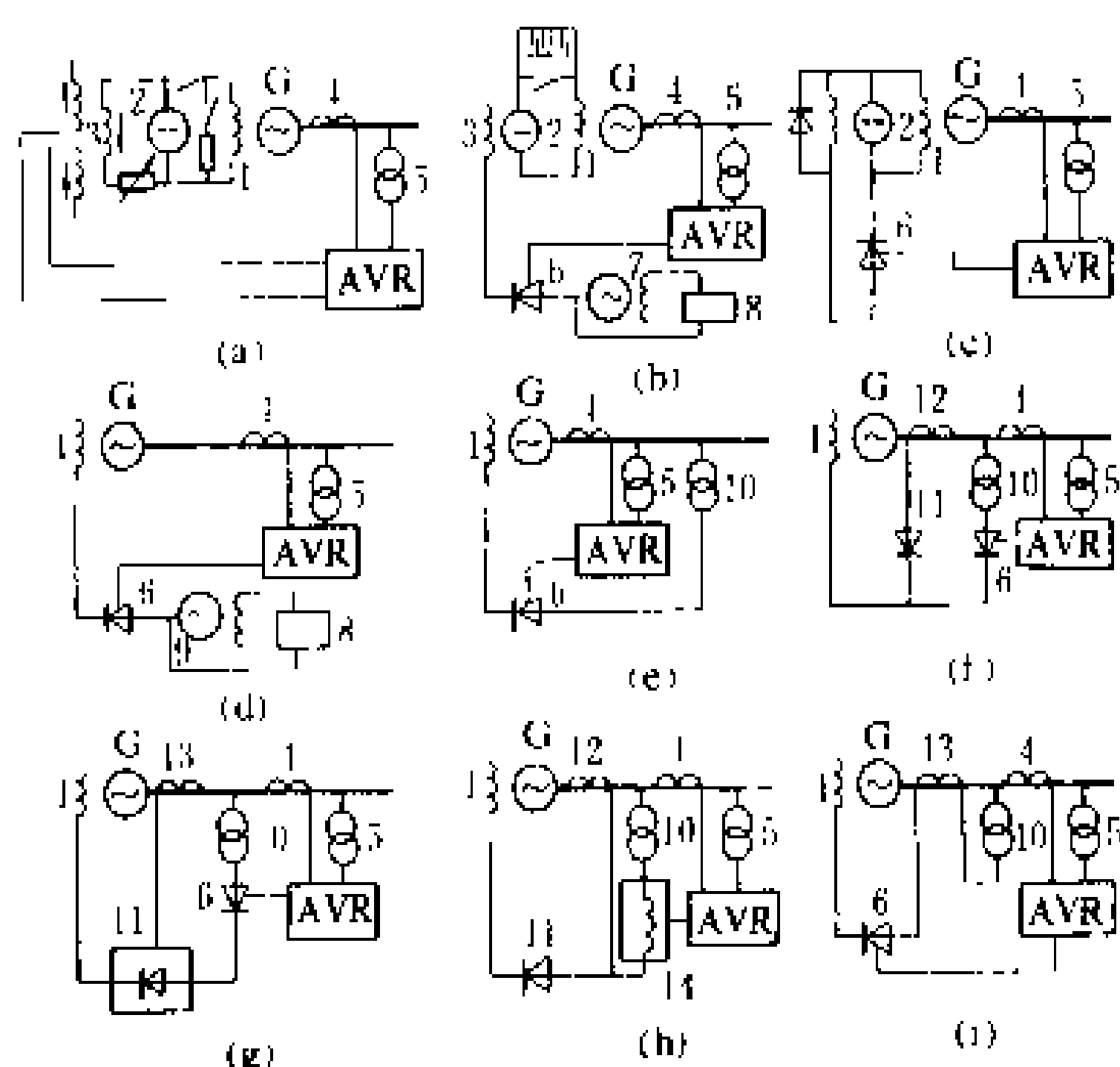


图 2 励磁系统原理接线

(a) 连续调节型直流电机励磁系统; (b) 带交流励磁机直流电机励磁系统; (c) 开关调节型直流电机励磁系统; (d) 他励晶闸管整流器励磁系统; (e) 自励晶闸管整流器励磁系统; (f) 直流侧并联自复励整流器励磁系统; (g) 直流侧串联自复励整流器励磁系统; (h) 交流侧并联自复励整流器励磁系统; (i) 交流侧串联自复励整流器励磁系统

1—转子绕组 (励磁绕组); 2—直流励磁机; 3—直流励磁机励磁绕组; 4—电流互感器; 5—电压互感器; 6—晶闸管整流器; 7—交流励磁机; 8—自励恒压装置; 9—交流励磁机; 10—励磁变压器; 11—二极管整流器; 12—功率变流器; 13—电流-电压变换器; 14—电抗器;

AVR 自动励磁调节器

整流器励磁系统 根据供给整流器交流电源的不同, 水轮发电机整流器励磁系统主要有他励晶闸管整流器励磁系统、自励晶闸管整流器励磁系统、自复励整流器励磁系统等, 这类励磁系统适用于所有水轮发电机。

他励晶闸管整流器励磁系统 其原理接线如图 2 (d) 所示。发电机的励磁电流由同轴交流励磁机 9 (亦称辅助发电机) 经晶闸管整流器 6 变换成直流后供给,

由于励磁电源与发电机的运行方式无关, 故称他励式。同轴交流励磁机的励磁电流由接于本身机端的自励恒压装置 8 供给, 当发电机工作在空载、负载和故障情况下, 同轴交流励磁机均保持其机端电压为恒定值。这种励磁方式的励磁电源不受发电机和电力系统运行状况的影响, 可靠性较高; 易于满足高起始响应的快速要求。其缺点主要在于同轴交流励磁机在结构布置上难以合理。

自励晶闸管整流器励磁系统 其原理接线如图 2 (e) 所示。发电机的励磁电流由接于机端的励磁变压器 10 经晶闸管整流器 6 供给, 并由 AVR 进行调节, 由于其励磁功率取自发电机机端, 故称自励式。本励磁方式结构简单, 反应快速; 无旋转部件, 易于维护; 取消了励磁机, 可适当降低厂房高度。其主要缺点是随着短路故障点的不同, 强行励磁能力将发生变化。当机端近处发生短路故障时, 由于作为励磁供电电源的发电机机端电压大幅度下降, 使得强行励磁的能力降低, 同时对带时限的电流保护的可靠工作也有不良影响。

自复励整流器励磁系统 励磁功率取自两部分, 一是取自与发电机电压有关的自励部分, 一是取自与定子电流有关的复励部分, 此系统同时具有自励和复励功能, 故称为自复励整流器励磁系统。依照接线方式的不同, 分为直流侧并联、直流侧串联、交流侧并联、交流侧串联四种自复励励磁系统, 分别见图 2 (f)、(g)、(h)、(i)。对于图 2 (f), 发电机的空载励磁电流由自励部分单独供给。带负荷运行时, 由取自定子电流的功率变流器的输出经整流后与自励部分直流侧并联供给励磁电流。对于图 2 (g), 自励和复励两部分输出直流电压之和即为励磁总电压, 提供的励磁功率是按各自的输出电压大小分配的。由于复励部分是以电压方式输出的, 故其供电电源应由具有气隙的电流-电压变换器供给, 以得到与定子电流成比例的输出电压。对于图 2 (h), 励磁变压器的输出电压经电抗器后, 可视为等值电流源, 其电流与功率变流器的电流相量相加, 整流后供给励磁电流。这种接线由于在发电机定子电流或功率因数变化时, 自动改变其输出电流, 故能按相补偿原理补偿电枢电压降。对于图 2 (i), 与定子电流成比例的电流-电压变换器输出电压和自励部分的电压相量相加, 经整流后输出励磁电流。

自复励整流器励磁系统在一定程度上, 弥补了自励式晶闸管整流器励磁系统在机端近处短路时强励能力的不足, 但其缺点是增加了励磁设备容量, 自励和复励两部分工作协调较复杂。

励磁调节器 励磁调节器按其构成方式可分为以晶体管或运算放大器组成的模拟式调节器和应用数字电路的数字式调节器。在模拟式调节器中, 又分磁性元



件输出方式和整流器元件输出方式，现已普遍采用整流器作为输出元件。

模拟式调节器 其主要构成框图如图 3 (a) 所示。测量比较环节用来测量发电机端电压与给定基准电压之间的偏差值。综合放大环节对输入电压偏差信号以及各类励磁控制信号进行比例相加并予以放大，使之成为既反映输入信号的大小又满足移相触发要求的控制电压。移相触发环节根据输入控制信号变化，相应地改变晶闸管触发脉冲的相位，以控制励磁电压，从而控制励磁电流。

数字式调节器 当采用微机时（微型计算机或微处理器），其主要环节构成框图如图 3 (b) 所示，测量硬件用以采集和输入信号。由微机进行综合、运算，将控制量转换成触发脉冲，经放大后，控制励磁功率单元。这种调节器又称微机励磁调节器。由于这种调节器借助软件，易于实现最优励磁控制以及自适应参数调节要求，受到了广泛的注意。

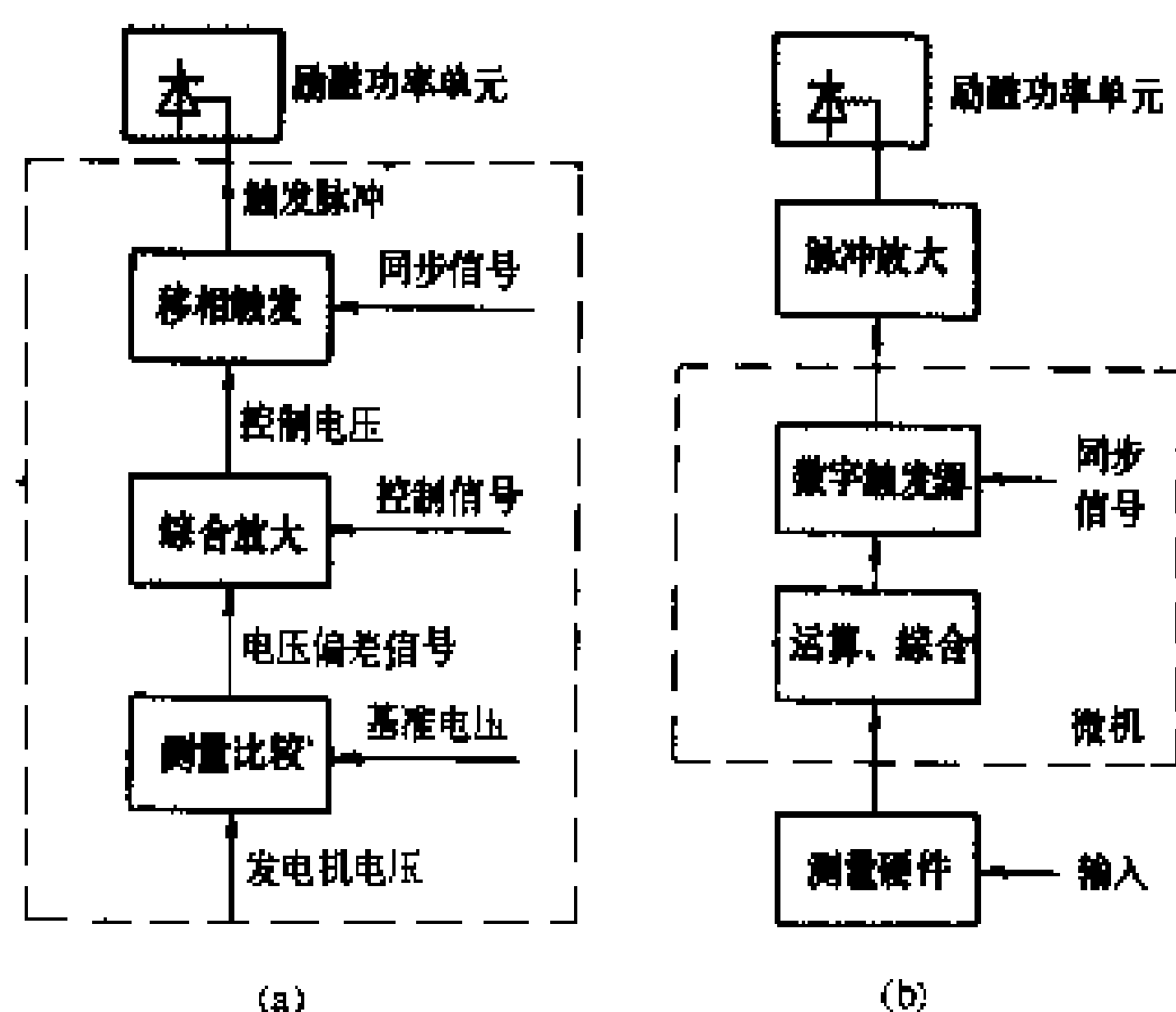


图 3 励磁调节器主要环节构成框图
(a) 模拟式调节器；(b) 数字式调节器

现代励磁控制 为满足电力系统稳定性的要求，在现代励磁控制中，采用了多种控制措施。①采用发电机电压和频率偏差以及频率导数等多参量调节，并选用小偏差和大干扰共同整定域的强力式调节器。②采用与功率有关的某些附加信号（如发电机转速偏差），提供具有正值附加阻尼转矩，用以补偿由于励磁系统的相位滞后特性而产生的负阻尼转矩，使合成阻尼转矩为正值，电力系统稳定器（PSS）。③采用按给定逻辑控制励磁的方式，以兼顾在大干扰和小偏差条件下为满足系统稳定对励磁调节提出的要求。④根据线性最优控制理论将励磁系统参量进行线性组合，按所要求的指标，实现全状态反馈、多变量输入-输出的最优控制励磁系统。

灭磁 发电机发生内部短路故障时，要求快速切断励磁回路，并将储存在转子绕组中的能量尽快地予

以消除，以免短路点事故的进一步扩大，这一过程称为灭磁。灭磁性能的主要要求是灭磁时间短和转子过电压不超过允许值。灭磁方法主要有四种：①放电电阻灭磁。由一台灭磁开关和一组灭磁电阻完成，灭磁时由灭磁开关先将灭磁电阻与转子绕组并联，然后切断励磁回路，磁场能量消耗在灭磁电阻上。②具有灭弧栅片的灭磁开关灭磁。灭磁时将灭磁开关并联或串联接至转子绕组，将磁场能量消耗在形成短弧的灭弧栅片上。③采用非线性电阻灭磁。由氧化锌和碳化硅制成的非线性电阻阀片组成，其电阻值随流过电流值的增大而减小，可以降低转子过电压的倍数，得到较快的灭磁速度。④利用晶闸管全控桥整流电路逆变灭磁，灭磁过程的实质是将整流器由整流工作状态转换成逆变工作状态，将转子磁场能量回馈到交流侧。

参考书目

李基成，现代同步发电机整流器励磁系统，北京：水利电力出版社，1987
樊俊，陈忠，涂光瑜编著，同步发电机半导体励磁原理及应用，第二版，北京：水利电力出版社，1991

(贺至刚)

shuitun fadianji shui neileng

水轮发电机水内冷 (directed water cooling of hydrogenerator)

将水通入导体内部的直接冷却方式。随着水轮发电机单机容量不断增大，采用空气冷却已难以满足电机散热要求，由于水的热容量和导热系数远比空气大，因此水内冷大大提高了冷却效能。根据采用水内冷的不同部位，可分为三种型式：①水轮发电机全水内冷，定子、转子绕组和定子铁芯均采用水内冷。②水轮发电机双水内冷，定子、转子绕组采用水内冷，定子铁芯采用空气冷却。③水轮发电机半水内冷，定子绕组采用水内冷，转子绕组及定子铁芯采用空气冷却。

与空气冷却相比（见水轮发电机空气冷却），水内冷水轮发电机不仅可以提高极限容量 1.5~2 倍，而且绕组运行温度低，冷却较均匀，因此可延长绝缘寿命，机组重量可以减轻 15%~30%，硅钢片节省约 40%，有色金属材料节省约 50%，绝缘材料节省约 60%。相同容量的水轮发电机转速越高或相同转速的水轮发电机容量越大，采用水内冷的经济效益越显著。由于水内冷减小了水轮发电机的尺寸和重量，相应也减少了主厂房起吊设备的容量和起吊高度。水内冷发电机的效率和电气参数较空气冷却发电机稍差，结构及运行维护复杂，需要配置水处理设备、管路及附件等。由于水在绕组线棒内流动对铜产生电解腐蚀、电化学腐蚀、氧化腐蚀等，因此要求水质纯净、无杂质，电导率小于 5

$\mu\text{S}/\text{cm}$ (水温 20°C 时)、pH 值为 $6\sim 8$ 、硬度小于 $10\ \mu\text{g}$ 当量/L, 通常采用离子交换树脂的水处理设备进行局部循环水处理。

中国是世界上较早开展研究水内冷发电机的国家之一, 早在 1958 年就开始研究试制了 $10\ \text{MW}$ 全水内冷水轮发电机, 随后又研制了 $75\ \text{MW}$ 和 $300\ \text{MW}$ 的双水内冷水轮发电机, 并分别于 1966 年和 1973 年投入运行。国外水内冷发电机技术发展很快, 加拿大、美国、苏联、奥地利、德国等国家制造了多台水内冷发电机, 其中包括发电电动机。

(邱景安)

shuitun fadianji tui li zhoucheng

水轮发电机推力轴承 (thrust bearing of hydrogenerator)

应用液体润滑承载原理承载水轮发电机组转动部分全部重量及水推力的机械结构部件。水轮发电机推力轴承主要由支承体、推力轴瓦、镜板、推力头、冷却器等组成。按支承体的结构型式, 推力轴承可分为刚性支承、弹性油箱支承、平衡块支承、弹性垫支承等, 还有采用弹簧支承、活塞支承、弹性圆盘支承等结构型式。按冷却器油循环冷却方式可分为内循环和外循环两类。按推力轴瓦冷却方式可分为普通推力瓦和水冷推力瓦两类。推力轴承的结构设计和润滑性能应满足轴瓦受力均匀、轴瓦温度分布均匀、油路畅通、冷却效果好、具有维持轴承正常运转所需的油膜厚度以及良好的油密封结构等要求。大容量水轮发电机推力轴承的负荷已达 $9.8\times 4700\ \text{kN}$ ($4700\ \text{tf}$)。

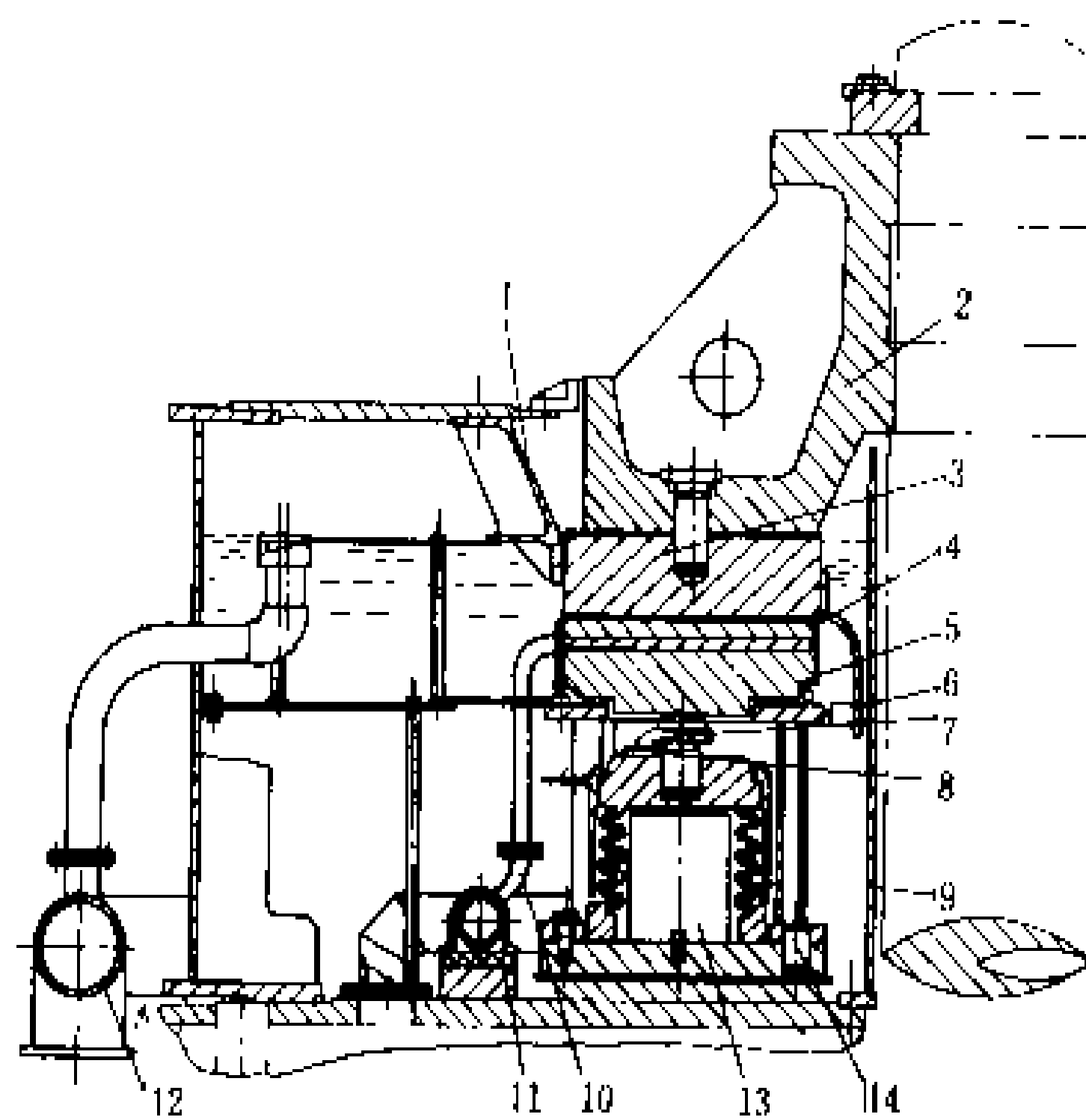
支承体 主要有刚性支承、弹性油箱支承、平衡块支承、弹性垫支承等。

(1) 刚性支承。该型式的推力瓦支承在头部为球面的支柱螺钉上, 结构简单, 但存在各瓦受力难以调匀, 瓦温差大, 安装调整工作量大等缺点, 一般适用于中、小容量水轮发电机组。为了改进轴瓦受力状况, 有的采用弹性推力头、增大托盘柔度、提高瓦的冷却效果等措施, 研制成瓦负荷可调及双排瓦的刚性支承, 扩大了刚性支承的应用范围。

(2) 弹性油箱支承。它是利用充有压力油的弹性油箱的弹性 (各油箱有油管连通, 充压力油), 可自动调节瓦的受力状况, 减小了瓦温差, 适用于推力负荷大的水轮发电机组。弹性油箱分四波纹、三波纹和单波纹结构。随着波纹数增多, 增加了工艺与结构的复杂性。有的还研制了双层弹性油箱支承结构, 减小了镜板、弹性油箱尺寸和轴承损耗, 便于制造, 是解决大负荷推力轴承结构的一种途径。弹性油箱支承的外循环推力轴承装配见图示。

(3) 平衡块支承。它是利用上、下平衡块搭接的圆

柱面相互动作, 自动调节瓦的负荷, 制造工艺也较简单。但存在平衡块动作灵敏度随转速上升而降低, 在压应力高的绞支点上存在滑动摩擦等缺点, 故仅适用于推力负荷中等的中、低转速水轮发电机组。



弹性油箱支承的外循环推力轴承装配

1—隔油罩; 2—推力头; 3—镜板; 4—推力瓦; 5—托瓦;
6—叶轮泵; 7—支柱螺钉; 8—锁定板; 9—挡油管; 10—
喷管; 11—进油管; 12—出油管; 13—支铁; 14—
保护套

(4) 弹性垫支承。它是依靠约 $5\ \text{mm}$ 厚耐油橡胶板的弹性变形吸收瓦的不均匀负荷, 这种结构的优点是安装、维护方便, 但弹性垫有塑性变形, 只适用于小负荷的推力轴承。

冷却器 按冷却器油循环的冷却方式可分为内循环冷却和外循环冷却两类。

(1) 内循环冷却。内循环冷却的推力轴承和油冷却器装在油槽内, 依靠轴承旋转和冷热油的对流形成循环油路, 经冷却器带走热量。有时在推力瓦内径进油区域的旋转部分装设叶轮泵, 以加强循环的冷却效果。

(2) 外循环冷却。外循环冷却借助独立的油泵或镜板旋转产生的压头 (或称镜板泵), 将热油送至油槽外面的冷却器进行冷却, 冷油流回油槽直接射到瓦的进油道, 完成热交换循环, 具有进油温度低、油槽尺寸较小、冷却器检修方便等优点, 适用于轴承损耗较大或油槽结构布置受运输条件限制或冷却水质较差的情况。

推力轴瓦 它是与转动部分接触并传递支承的部件, 通常采用普通瓦, 即在 $60\sim 100\ \text{mm}$ 厚的钢坯瓦表面加工出鸽尾槽, 然后浇铸轴承合金。为了改善瓦的散热条件并防止热变形, 有的采用双层瓦、铜坯瓦、水冷瓦、塑料瓦等。水冷瓦是在普通瓦的瓦体内直接通水冷却, 瓦温较普通瓦低, 可提高轴瓦的承载能力, 并可使



油冷却器容量减少约一半以上。塑料瓦是用耐磨、抗裂、绝缘性能好、摩擦系数小的聚四氟乙烯作为轴承摩擦面（厚约 0.5~1 mm）热压在铜丝垫层上，其余为钢质瓦体，其优点是起动、停机不需要附加装置（如高压油顶起、制动停机装置等），油温低，安装、检修不需要进行研刮瓦或其他加工，运行寿命长，苏联于 1974 年采用塑料瓦，运行情况良好。

镜板 镜板的顶面与推力头固定，底面与固定部分通过油膜接触，是推力轴承关键部件之一。由于油膜厚度只有 0.03~0.07 mm，因此要求镜板有较高的精度和光洁度。镜板上、下面的平行度对安装时机组摆度的调整和运行稳定性有直接影响。通常镜板采用整体结构，只有受运输条件限制时，才采用分瓣结构。

推力头 它是承受轴向负荷和传递转矩的部件，有 L 形、靴形和轮毂形。L 形推力头多用于推力轴承设在单独一个油槽内的悬式结构，靴形推力头多用于推力轴承与导轴承合用一个油槽的悬式结构，轮毂形推力头常与发电机转子轮毂铸成一体，或采用铸焊结构，适用于伞式水轮发电机。

（邱景安）

shuilun fadianji zhoudianliu

水轮发电机轴电流（shaft's current of hydrogenerator） 流过发电机轴颈与轴瓦之间的电流。它产生的原因，是由于发电机在运行过程中，磁场回路的不均衡性，在发电机轴和轴瓦回路，产生轴电压，从而出现轴电流。水轮发电机轴电压的数值较小，仅有几伏。但是一旦轴瓦支撑对地绝缘受到破坏，轴与轴瓦之间，就形成较大的电流回路，产生电火花，使轴表面与轴瓦烧损。中国丰满水电站在 20 世纪 50 年代曾发生过此类事故。

为了防止轴表面与轴瓦免受轴电流烧损，在推力轴承底座加上绝缘垫，或在轴颈上加上绝缘，以及所有与轴瓦有关连的温度计都予以绝缘处理，使在这些回路中形成较高的绝缘电阻，就能限制轴电流使其不危害设备，中国的水轮发电机轴绝缘电阻在运行中一般规定最低为 0.3 MΩ。国外，有的还在加强绝缘基础上，装设轴电流保护装置，一旦电流增大，就发出信号使机组停机。

（黄宣范）

shuilun fadianji zhundong guanjing

水轮发电机转动惯量（rotational inertia of hydrogenerator） 水轮发电机组转动部分旋转时所产生的惯性力矩 J ，其值等于转动部分的质量微元与微元到转轴的半径平方乘积的总和。转动惯量除

用惯性力矩 J 表示外，在工程上还常用转动部分的重量 G 与其惯性直径 D 平方的乘积 GD^2 表示，称为转动部分的飞轮力矩，两者关系式为

$$GD^2=4gJ$$

式中 G 为机组转动部分重量，N； D 为机组的惯性直径，m； g 为重力加速度，m/s²； J 为机组转动部分的惯性力矩，kg·m²。

转动惯量表明电力系统出现大干扰时，水轮发电机组转动部分保持原来运动状态的能力，所以对电力系统的暂态过程和动稳定有很大影响。在一定的极限切除时间下，转动惯量越大，输送功率就可以提高。转动惯量对水轮机调节保证计算也有很大影响，转动惯量大，机组甩负荷后的转速上升率如保持一定值，则可允许较大的压力上升率，从而可以减小引水钢管直径或允许增加钢管长度，甚至不设调压井。但增大转动惯量将增加发电机重量和造价，也延长了机组的起动时间。

当水轮发电机基本尺寸确定后，转动惯量 GD^2 值可按下列经验公式计算

$$GD^2=kD_1^{1.5}l_1$$

式中 D_1 为定子铁芯内径，m； l_1 为定子铁芯长度，m； k 为经验系数，一般可按下表选取：

机组转速(r/min)	<100	100~375	>375
k	5.2	5.0	4.8

大容量低转速水轮发电机组的转动惯量最大已达 429000 tf·m²（4.21GN·m²）。

（邱景安）

shuilun fadianji zhuanxu

水轮发电机转速（rotational speed of hydrogenerator） 水轮发电机每分钟旋转的次数，单位是 r/min。发电机转速与结构尺寸及材质强度的关系密切，通常转速越高，结构尺寸越小，对材质强度要求也越高。工程中发电机转速可分为额定转速、飞逸转速和临界转速三类。

水轮发电机额定转速 额定工况下的转速，并对应于某个同步转速。额定转速是根据水轮机转轮型式、工作水头、流量（见水轮机流量）及效率等因素决定的，还应满足水轮发电机电磁设计（如电压、槽电流等）以及结构布置需要，应对几种可能采用的同步转速进行分析比较后确定。50 Hz、60 Hz 下常用的同步转速值见表。

水轮发电机飞逸转速 当机组在最高或额定水头下突然甩满负荷，调速系统失灵，导水叶在最大开度时



50 Hz、60 Hz 下常用的同步转速值 (r/min)

极数	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	28	30	32
50Hz	1500	1000	750	600	500	428.6	375	333.3	300	250	214.3	200	187.5
60Hz	1800	1200	900	720	600	514.3	450	400	360	300	257.1	240	225
极数	36	40	44	48	56	60	64	72	80	88	96	104	112
50Hz	166.7	150	136.4	125	107	100	93.8	83.3	75	68.2	62.5	57.7	53.6
60Hz	200	180	163.6	150	128.6	120	112.5	100	90	81.8	75	69.2	64.3

机组可能达到的最高转速。飞逸转速与额定转速之比值称为飞逸系数，其值对混流式和冲击式水轮发电机组为 1.6~2.2；对轴流式水轮发电机组为 2.0~2.6。机组转动部分的结构与材料强度应满足在飞逸转速下运转而不致变形损坏。

水轮发电机临界转速 机组在旋转中产生共振的转速。水轮发电机组的临界转速在低于额定转速或高于额定转速的区域内都有可能出现，为避免机组在临界转速下共振造成破坏，在低于额定转速范围内，须在临界转速附近采用加快升速的办法，使机组迅速通过共振区；对高于额定转速的临界转速造成的机组共振，通常由设计保证，使临界转速为机组飞逸转速的 1.2 倍以上。

(邱景安)

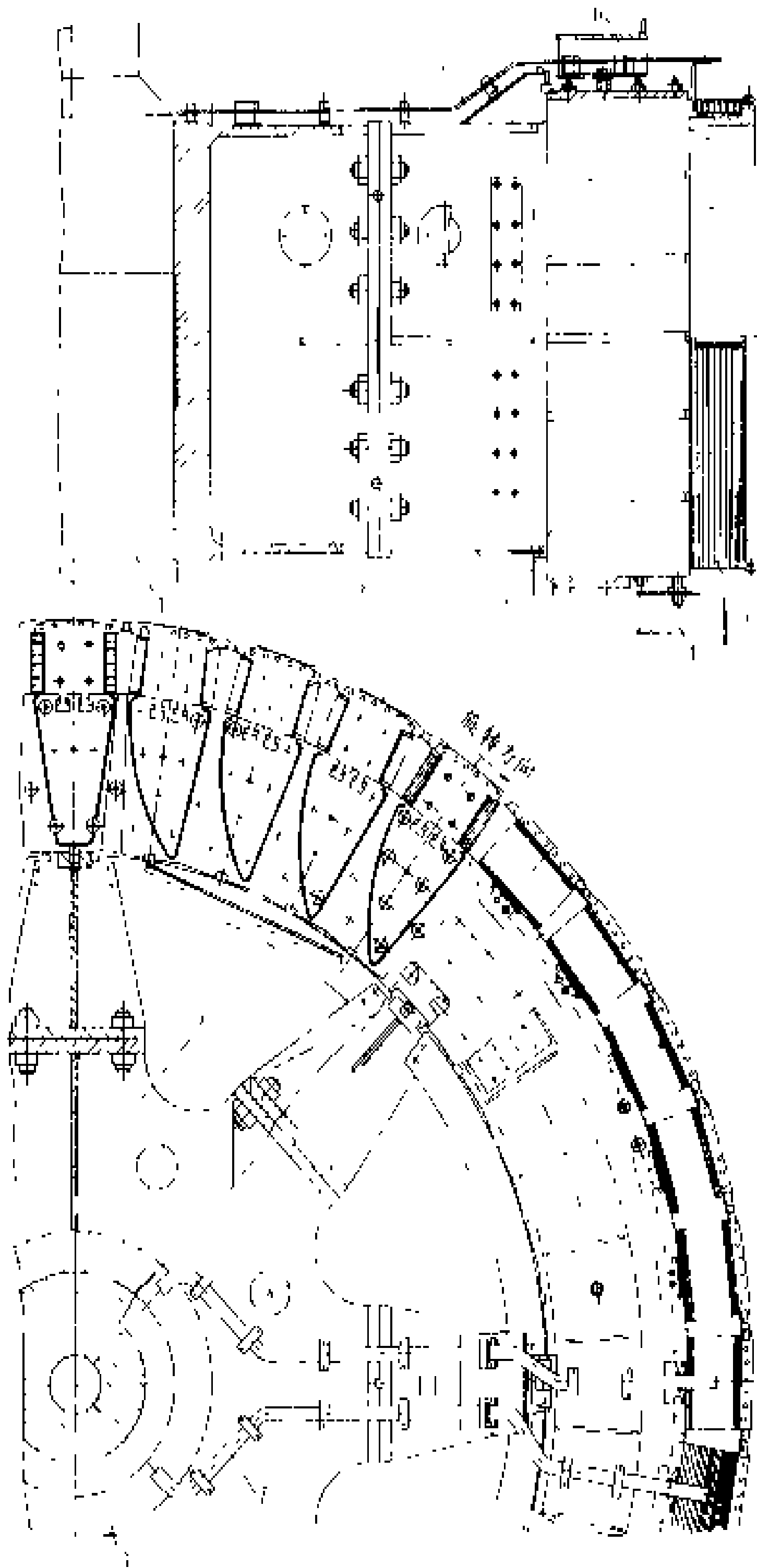
shuitun fadianji zhuanzi

水轮发电机转子 (rotor of hydrogenerator)

水轮发电机的转动部件。转子由转轴、支架、磁轭、磁极、集电装置等组成，用以产生磁场、变换能量和传递转矩。磁极的励磁电流由直流励磁机或整流式励磁装置通过集电装置供给（见水轮发电机励磁）。转子的结构型式主要由支架所确定。水轮发电机转子结构见图示。

转轴 一端与水轮机主轴连接，用于传递扭矩。正常运转时，立式水轮发电机转轴上的主要负荷有：额定转矩；机组转动部分重量和水推力产生的轴向力以及采用热套结构时的径向配合力。常用的有一根轴结构和分段轴结构。一根轴的结构简单、调整方便，适用于中、小容量水轮发电机和大容量悬式水轮发电机。分段轴通常由上端轴、转子支架中心体和下端轴组成，上端轴和下端轴分别用螺栓与转子支架中心体连接，具有便于锻造、运输以及不需热套轮毂等优点，适用于中、低转速的大容量伞式水轮发电机。

支架 连接磁轭和转轴的中间部件，正常运行时要承受扭矩、磁极和磁轭的重力矩、自身的离心力以及热打键径向配合力的作用。常用的结构型式有：与磁轭合一的转子支架；圆盘式转子支架；整体铸造转子支



水轮发电机转子结构

- 1—转轴；2—转子支架；3—磁轭；4—下风扇；5—磁极；
6—上风扇；7—转子引线

架；组合式转子支架。①与磁轭合一的转子支架由轮毂、轮辐和磁轭三部分组成，适用于转子飞逸周速不高于 110 m/s，定子铁芯外径较小的中、小容量水轮发电机。②圆盘式转子支架由轮毂、上圆盘、下圆盘、撑板和立筋等组成，具有刚度大、传递转矩大及通风损耗小的优点，适用于定子铁芯外径为 325~640 cm 的中、低

转速大、中容量水轮发电机。③整体铸造转子支架适用于定子铁芯外径为 410~640 cm, 转子飞逸周速为 140 m/s 的高转速大容量水轮发电机。④组合式转子支架由中心体和转子支臂组成, 适用于定子铁芯外径大于 640 cm 的大容量水轮发电机。

磁轭 水轮发电机转子磁轭是发电机磁路的组成部分, 也是固定磁极的结构部件。正常运行时, 磁轭受到转动扭矩、磁极及磁轭本身离心力的作用。小容量水轮发电机的转子磁轭可通过键或热套等方式与转轴连成整体; 大、中容量水轮发电机的转子磁轭则通过支架与轮毂和转轴连成一体。磁轭由扇形冲片叠成, 用拉紧螺杆紧固, 外缘并有“T”尾槽、鸽尾槽或螺孔以固定磁极。磁轭与支架之间通常采用径向键或切向键楔紧的固定结构。

磁极 水轮发电机转子磁极是产生磁场的部件。由磁极铁芯、线圈、托板、阻尼绕组等零部件组成。①磁极铁芯有实心 and 叠片两种结构。实心磁极采用锻钢或铸钢制成, 具有机械强度高、阻尼性能好、异步起动力矩大、极靴表面损耗较大的特点, 常用于高转速的水轮发电机。抽水蓄能电站发电电动机的转子, 也有采用实心磁极的, 以适应频繁起动和异步起动的要求。叠片磁极用 1~1.5mm 厚的钢板冲片叠成, 用铆钉铆合或用拉紧螺杆紧固成整体。②磁极线圈常用裸扁紫铜排绕成, 匝间垫以多层环氧玻璃坯布, 并用铜排热压成一体, 是励磁绕组的组成部分。托板由环氧玻璃布板加工而成, 用于承受线圈对地绝缘。③阻尼绕组由阻尼条、阻尼环和连接片组成。阻尼条多用软质紫铜棒制成, 镶嵌在磁极铁芯的阻尼条孔内, 两端伸出与阻尼环连接。阻尼环用扁紫铜带弯成扇形段, 每个磁极一段, 固定在磁极上下两端, 通过连接片将扇形段连成阻尼环。连接片由多层薄紫铜片制成, 形似 Ω, 在机械力和热应力作用下可以产生补偿效果。连接片将相邻磁极的扇形段连成阻尼环, 上、下阻尼环又通过阻尼条连接形成鼠笼状的阻尼绕组。

集电装置 由集电环、电刷和刷架等组成。集电环固定在转轴上, 经电缆或铜排与励磁绕组连接。电刷放在刷架内, 刷架则固定在上机架或励磁机架内。

(邱景安)

shuilun fadianji zhuanzi dongpingheng

水轮发电机转子动平衡 (dynamic rotor balance of hydrogenerator) 使水轮发电机转子在运行中的动力矩基本平衡的方法。水轮发电机在运转过程中, 存在着机械、水力、电磁几方面不平衡的因素, 若所产生的附加惯性离心力, 使其中心惯性主轴与旋转轴不一致而无法稳定运行时, 必须通过其转子的

动平衡校正, 使其达到动力矩平衡的目的。在水轮机静平衡的基础上, 检查转轮叶片出水边开口尺寸的均匀程度, 以分析水力不平衡因素, 但对这种制造上的问题难以在运行机组上纠正。发电机转子在预装配过程中, 除应对每个零部件按其重量和安装部位作好单独平衡或综合平衡外, 还应检查定子、转子之间的空气间隙是否均匀, 以判明电磁力是否平衡。如因励磁机引线不当所引起, 则可在励磁机引线的正下方和对方分别试加重试验。转子内部任何复杂的不平衡所形成的离心力, 都可按对支点离心力矩相等的原理, 转移到转子的两端面上来, 实际上不平衡质点所形成的离心力是无法进行计算的, 当机组存在较大失衡且发电机转子直径与铁芯长度之比小于或等于 2.5~3.0 时, 即需作两端面校正的动平衡试验。

测点布置 上机架水平和垂直振动测点各两个分别置于互成 90° 的两支腿方向。在对应方位安装下机架水平振动测点两个。在上导、下导和水导轴承处各安装摆度测点两个。在大轴的任一已知方位应装有作为相位参考标志的轴信号, 并与振动、摆度信号同步记录在示波图上, 振摆的波峰或波谷与轴信号的相对位置即为不平衡的方位。

试加重量的估算和安装 根据经验公式, 试加重量

$$W = (5 \sim 25) \frac{G}{n_0^2 r}, \text{ kg}$$

式中 G 为发电机转子装配重量, kg; n_0 为机组额定转速, r/min; r 为试加重半径, m; 系数的选择既要考虑使机组振动在加试重后有较明显的反映, 又要考虑到不致于使振动值增加过大而危及机组的安全。配置平衡重块时, 应预先确定转子径向不平衡的部位, 及作用于垂直面上的不对称力矩, 即在不对称力矩作用的同一垂直平面内, 在对边轮臂上加配重来校正动态不平衡。试重装配应既紧固又容易拆卸, 可加在发电机轮毂内侧面接近发电机转子上、下端处, 或以拆卸转子上、下同方位的 1~3 个风扇来代替对方加试重的方法。

试验步骤 应用综合平衡法进行双断面的动平衡校正。该方法利用既简单又直观的动态轴线形态图, 既考虑了机械、电磁及水力不平衡的影响, 又考虑了轴的弓状回旋形态及其影响。①机组第一次起动, 测量机组原始状态下的上导、下导及水导或相应断面处的摆度幅值及其方位, 按同一比例及各自相对于轴信号的角度自原点画直线得各摆度值的向量, 顺序连接这些线的顶点, 即为运行状态下的轴线顶视图。②根据上述轴线的形状, 确定试加配重量及其方向, 以减小轴线至中心的距离。③加试重后机组第二次起动, 仍按上述方法测试三处导轴承附近大轴的摆度, 其测点位置与第一

次相同,同样画出轴线顶视图。对比试加重前、后轴线顶视图在幅值、方位、形状方面的变化,以第一次加试重后的情况作为原始状态,确定第二次试加重的大小和方向。④机组第三次起动,如前所述画轴线顶视图。如几次试重块需加在不同的方位时,最后可合为一块,其大小为几个试重块的矢量和。正常情况下,经2~3次试加重后,平衡校正即可完成。否则应检查机组的轴承间隙等是否有不正常的现象。

注意事项 注意事项包括:①当在带负荷工况下校正平衡时,应校核空转工况时的摆度,并使之也在允许范围内。②在任何情况下都要注意减小水导摆度值,以免引起迷宫间隙中的水压脉动的增大。③新机组试运行,应先在空转情况下平衡,再在带负荷情况下重新配重。

(刘丽来)

shuilun - fadianjizhu buduichen yunxing

水轮发电机组不对称运行 (unbalanced operation of water turbine generator set)

水轮发电机组每相负荷的电流值及其相角处子互不相等情况下的一种运行方式。三相电力系统可分解为正序、负序、零序三个对称系统,对称运行时负序和零序分量为零,不对称运行时出现负序及零序分量。负序电流能引起定子绕组超温、转子附加发热和机械振动。

定子绕组超温 由于负序电流出现后,和正序电流叠加,定子绕组会有一相相电流超过额定值,从而使该相绕组温升超过允许值。

转子附加发热和机械振动 负序电流出现后,其负序旋转磁场以同步速度与转子反方向旋转,在励磁绕组、阻尼绕组以及转子本体中感应出两倍频率的电流,迫使这些部件产生附加损耗,引起局部发热。负序磁场还能在转子轴上产生两倍频率的脉动转矩,使水轮发电机组产生振动并伴有噪声,在铁芯定位筋等处振动较大。

水轮发电机组转子是凸极的,散热条件好,所以,其绕组可承受较大的温升。但是,水轮发电机组的转子直径较大,由于负序电流引起振动也比较严重,同时,由于水轮发电机座是焊接件,承受振动能力较弱,因此,振动能引起金属疲劳和机械损坏。

不对称容许范围 主要决定于下列三个条件。①负荷最重相定子电流不超过额定电流值。②转子任一点温度不超过绝缘材料等级的容许温度。③出现的机械振动,不超过容许范围,尤其是铁芯定位筋等焊缝应力不超过设计允许值。由于水轮发电机组结构、材料、冷却方式不同,其允许范围也不同。一般是:水轮发电机组在不对称电力系统中运行时,任何一相电流

不超过额定值,且其负序电流分量与额定电流之比不超过9%;对于灯泡式水轮发电机在50 MV·A及以下者不超过12%。具体来说,一定要经过水轮发电机组负序承受能力的试验,才能正确决定其允许值。

这些试验的项目一般是:①水轮发电机在额定转速下空转,测量转子空转温升及定子定位筋部位振动。②水轮发电机空载运行在70% U_n 、80% U_n 及100% U_n 电压下,测量转子绕组、表面结构件及定子各部振动。③在水轮发电机二相短路下($I_2=5\%I_n$ 、 $I_2=10\%I_n$ 、 $I_2=15\%I_n$),测量转子绕组、表面结构件温升及定子各部的振动。④在水轮发电机三相短路下(50% I_n 、60% I_n 、70% I_n),测量转子绕组、表面结构件、定子齿压板温升及定子各部件振动。⑤在水轮发电机三相平衡负载下(60% P_n 、80% P_n 、100% P_n)测量各部件温升和振动。⑥在功率因数为0.8、0.85、0.9下进行调整特性试验。⑦测量水轮发电机在二相负载下的转子绕组、表面结构的温升及定子各部件振动。由以上不同方式下测得的水轮发电机温升及振动,通过计算确定其承受不平衡负荷的能力。

(黄宣范)

shuilun - fadianjizhu dai fuhe shiyan

水轮发电机组带负荷试验 (on-load test of water turbine generator set)

水轮发电机组起动试运行中带负荷时机械和电气的试验工作。带负荷试验的目的是检验机组及其辅助设备在各种负荷工况下的运行情况,为机组投产发电作好准备。主要试验内容有主变压器升压及冲击合闸试验、甩负荷试验、低油压关闭导水叶试验、发电机作调相运行试验、机组带负荷下调速系统和励磁装置的试验等。

主变压器升压及冲击合闸试验 一般水轮发电机都通过主变压器升压后与电力系统连接。主变压器第一次利用发电机升压可从零升起,在额定电压的25%、50%、75%、100%下检查发电机电压设备和主变压器的情况,检查有无不正常的声音及异常现象。主变压器升压后情况正常,即可进行冲击合闸试验。冲击合闸试验的目的主要是检查差动保护装置是否能躲过冲击时的励磁涌流。冲击合闸最好在主变压器高压侧利用系统电压进行。此时主变压器低压侧与发电机断开。冲击合闸一般在额定电压下进行5次。

甩负荷试验 甩负荷试验的目的是检查当机组甩负荷时,水轮机调速器和励磁调节器(见水轮发电机励磁)的动态特性和检验蜗壳压力上升率与转速上升率是否符合设计要求。甩负荷试验一般甩有功负荷。当机组带负荷运转突然甩掉负荷时,通过水轮机的水量保持不变,因而水轮机得到了过剩的力矩,此力矩使机组

加速。机组转速升高后，调速器即迅速关闭导水叶，减少进水量，机组转速下降。导水叶关闭时间愈短，机组转速上升愈小，蜗壳和压力管道中的压力上升愈大。因此，必须选择适当的导水叶关闭时间，使蜗壳和压力管道的压力上升率和机组的转速上升率都不超过设计允许值。甩负荷试验分四个阶段进行，即分别按额定有功功率的 25%、50%、75%、100% 甩四次。对于并入电网的机组，甩负荷的方法是机组带上预定的负荷，跳开发电机断路器或主变压器高压侧断路器，突然将负荷甩掉，此时要记录机组的负荷、转速、蜗壳压力、顶盖及尾水管真空压力、导水叶开度、接力器行程、各轴承温度、机组各部位的摆度和振动以及上下游水位等。不仅要记录甩负荷前后的数据，还要记录在甩负荷过程中出现的最大值。然后计算出蜗壳压力上升率、机组转速上升率和调速器的残留不平衡度。对于电力系统容量较小，甩系统负荷有困难的机组，往往采用水电阻器作负荷进行甩负荷试验。

低油压关闭导水叶试验 试验的目的是为了检验机组在带额定负荷时导水叶在规定的最低油压下是否能正常关闭。当水轮发电机在运行时，如油压装置或管路发生事故，油压突然下降，为了在还有一定油压和油量时能将导水叶关闭，制造厂规定了一个能够关闭导水叶的最低油压。当达到此值时，低油压继电器动作关闭导水叶而停机。试验方法是将机组并入电力系统并带上额定负荷，油压装置的油泵停止运转，人为地降低油压装置的油压和油位到设计规定值，低油压继电器动作关闭导水叶。为了保证机组的安全，试验时与电力系统不解列，以避免导水叶不能关闭时可能发生转速上升过高的事故。

发电机作调相运行试验 根据电力系统的要求，有些水电站的机组作调相运行，向系统提供无功功率。试验时先起动水轮发电机组与系统并列，然后将导水叶关至全闭，机组即转入调相工况运行。机组本身消耗的有功功率由系统提供。为了减少有功功率消耗，电站装设一套压缩空气系统和管路，利用压缩空气将水轮机转轮室内的水位压低，使转轮在空气中旋转，此时所消耗的有功功率仅为在水中的十分之一左右。试验时记录机组的无功功率、定子电压、定子电流、转子电压、转子电流、有功功率及各轴承温度、机组各部位的摆度和振动。

机组带负荷下调速系统和励磁装置的试验 机组带负荷后应分别对调速系统和励磁装置进行试验。调速系统试验包括突变负荷试验、甩负荷试验和低油压关闭导水叶试验。

励磁装置试验 包括功率单元均流及均压测试，发电机电压调差率测定，手动、自动切换试验，整流装置

冷却系统性能及噪声测定，机组带无功负荷及甩负荷试验和灭磁特性试验等。

(王 冰)

shuilun - fadianjizhu dongli texing

水轮发电机组动力特性 (dynamic characteristic of water turbine generator set)

水轮发电机组在能量转换过程中每两个动力指标之间的

函数关系。常用的动力

指标有三种：①绝对动

力指标，以原有单位表

示的动力数量，如 H ，

机组水头，单位为 m ；

Q ，机组过流量，单位为

m^3/s ； P_g ，发电机输出

功率，单位为 kW ； ΔP ，

功率损失，单位为 kW 。

②单位动力指标，如 η ，

效率，为机组输出功率

对输入功率的比值，以

百分数 % 表示； q ，单耗，

为流量对出力的比值，

单位为 $m^3/(s \cdot kW)$ 。

③微分动力指标，如

Δq ，微增耗水率又称微

增率，为微增流量 ΔQ

与其对应的微增出力

ΔP_g 的比值，单位为

$m^3/(s \cdot kW)$ 。通过原型

机组在不同定水头下的

效率试验，可获得相应

水头下机组的各项动力

指标。机组动力特性通

常以动力指标发电机输

出功率 (P_g ，又称机组

出力) 作为自变量，其他

动力指标如流量 (Q)、

功率损失 (ΔP)、输入功

率 (P)、效率 (η)、耗

水率 (q) 以及微增率

(Δq) 等作为因变量的

曲线表示。动力特性曲

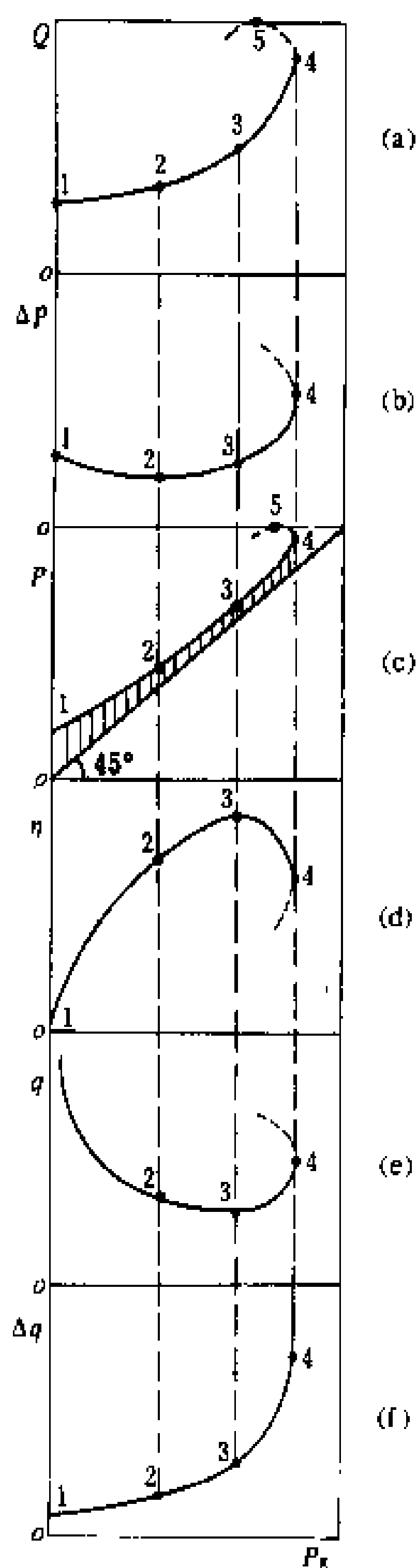
线示意图

(a) 流量特性曲线；(b) 功率损

失特性曲线；(c) 功率特性曲线；

(d) 效率特性曲线；(e) 耗水率

特性曲线；(f) 微增率特性曲线



水轮发电机组动力特性曲

线示意图

(a) 流量特性曲线；(b) 功率损

失特性曲线；(c) 功率特性曲线；

(d) 效率特性曲线；(e) 耗水率

特性曲线；(f) 微增率特性曲线

曲线表示。动力特性曲线广泛应用于水电站的经济运行中，可根据这些特性曲线研究最优运行方式问题。

(1) 流量特性曲线。表示发电机输出功率与流量的关系，即 $Q = f(P_g)$ ，见图 (a)。当 P_g 为零时，相应的流量 Q 为空载流量，点 1 为空载点。超过最大出力



点4后,流量虽然增加,因效率急降,出力反而减少。该曲线可由实测得出。

(2)功率损失特性曲线。表示发电机输出功率与功率损失的关系,即 $\Delta P=f(P_g)$,见图(b)。功率损失 ΔP 包括水力、机械、电气等损失,点2为功率损失最小值。该曲线可由流量特性曲线经过换算得出。

(3)功率特性曲线。表示发电机输出功率与输入功率的关系,即 $P=f(P_g)$,见图(c)。该曲线除实测外,也可通过输入功率 $P=P_g+\Delta P$ 求得;当 $\Delta P=0$ 时, $P=P_g$ 即 $P=f(P_g)$ 为一条与横坐标轴成 45° 角的直线;当 ΔP 不等于零时,根据 $P=P_g+\Delta P$ 的关系,将各 P_g 点对应的 ΔP 叠加在 $P=P_g$ 的直线上,即可得实际的功率特性曲线。

(4)机组效率特性曲线。表示发电机输出功率与效率的关系,即 $\eta=f(P_g)$,见图(d)。可由 $\eta=\frac{P_g}{P}$ 或 $\eta=\frac{1}{1+\frac{\Delta P}{P_g}}$ 关系作出,或由实测得出。在空载点1处效率为零,随着出力的增加,效率也增高,并有一个最大值点3,超过最高效率所对应的出力后,再增加出力时,效率反而会降低。

(5)耗水率特性曲线。表示发电机输出功率与耗水率的关系,即 $q=f(P_g)$,见图(e)。耗水率为发电机单位输出功率的耗水量,即 $q=\frac{Q}{P_g}$ 。空载处耗水率极大,在最高效率相应的出力处,耗水率最小,可由计算求得。

(6)微增率特性曲线。表示发电机输出功率与微增率的关系,即 $\Delta q=f(P_g)$,见图(f)。微增率是流量特性曲线上各工作点切线的斜率,可由计算求得。

上述六条典型的动力特性曲线,反映了各自的物理意义及其相互间的内在联系。五个特征点分别对应一种特殊的工况点:如动力特性曲线上点1为空载点;点2为功率损失最小点;点3为效率最高点、耗水率最小点;点4为出力最大点;点5为流量最大点。

(刘丽柔)

shuilun - fadianjizhu jinxiang yunxing

水轮发电机组进相运行 (leading power factor operation of water turbine generator set)

水轮发电机组处于欠励运行,以吸取电力系统剩余的容性无功功率又送出有功功率的一种运行方式。对于长距离输电的超高压、特高压线路,在轻负荷时,由于剩余容性无功功率,引起送电端电压上升,接近或超过电力系统运行电压的上限,严重地影响电力系统电压质量与安全运行。为降低此电压,可以采用并联电

抗器来吸收电力系统剩余的容性无功功率,虽也能达到降低电压的目的,但设备投资较大,不如水轮发电机组进相运行简单、安全、经济、方便。

水轮发电机组进相运行后,可以降低送端电压,节约电能,改善电网的供电质量,保证用户设备安全,提高电站经济效益。这是由于定子电压下降,转子电流下降,使水轮发电机的铁损也随之下降,转子铜损也降低,虽然此时定子铜损也相应增大,但综合的结果,发电机总损耗还是下降的,节能效果是明显的。

水轮发电机组进相运行能力的大小,受其静态稳定极限、定子铁芯、定子端部金属结构件的温升和定子过电流的限制。更主要的是受电厂厂用母线电压限制。因此,按中国水利电力部1982年颁布的《发电机运行规程》规定:“发电机是否能进相运行,应遵守制造厂的规定,制造厂无规定时,应通过试验来确定”。

水轮发电机组进相运行时,必须带自动电压调节器,这样可以提高静态稳定能力,即使在功角达到或超过 90° 时,机组仍能稳定运行,并且励磁电流的调节也很平稳。因此,水轮发电机组在电力系统负荷低谷时,采用进相运行,可改善电力系统电压质量。

(黄宝范)

shuilun - fadianjizhu kongzai shiyan

水轮发电机组空载试验 (no-load test of water turbine generator set)

在水轮发电机组起动试运行中,机组带负荷前的机械和电气的试验工作。试验内容包括机组起动空转及停机试验、发电机三相短路试验、发电机定子绕组直流耐压试验、发电机空载升压试验、机组过速度试验、空载下调速器和励磁系统试验、同步回路检查和试验。机组空载试验的目的是在不带负荷的情况下检查机组和调速系统、励磁系统(见水轮发电机励磁)以及其他辅助设备的制造和安装质量,消除发现的缺陷,使各项设备符合设计和规范的要求,以便进行机组带负荷试验。

机组起动空转及停机试验 机组第一次起动以手动方式进行。起动前用压油泵将压力油压入制动闸将转子顶起,或用高压油顶起装置顶起转子,使推力轴承的镜板与推力瓦之间形成油膜。当机组及附属设备具备首次起动条件时操作水轮机调速器的开度限制机构缓慢地将导水叶打开,机组徐徐起动达到额定转速。此时检查各部轴承温升和各处有无漏水、甩油、碰撞等异常现象。如发现严重情况应立即停机。

机组在额定转速下测量水轮机导轴承、水轮机主轴法兰、水轮发电机导轴承等处的摆度和上机架的振动。连续运转4~6h,各部轴承温度已趋稳定后即可停机。



停机也用手动操作开度限制机构关闭导水叶,当机组转速降至20%~40%额定转速时,打开制动闸的压缩空气阀门,使机组停机。

发电机三相短路试验 水轮发电机定子出口处装设临时三相短路线,起动机组至额定转速,调整发电机的励磁电流使发电机定子电流由零升至额定值。录制发电机定子电流与转子电流的关系曲线,此曲线呈直线。

三相短路试验时可同时检查发电机的测量表计和继电保护装置的电流回路。在完成上述试验后,将机组停机,拆除发电机定子出口处的短路线,再在主变压器高压侧母线以及线路出口等处设置短路线。再起动机组至额定转速,调整励磁,利用短路电流检查主变压器、母线、线路的测量表计和继电保护装置的电流回路。

如发电机绝缘受潮,可利用短路电流进行干燥。

发电机定子绕组直流耐压试验 短路干燥后,机组停机,拆开中性点和引出线,进行定子绕组每相对地的直流耐压试验,试验电压为3倍额定电压,时间1min。耐压前后测量定子每相对地的绝缘电阻和温度。

发电机空载升压试验 发电机在额定转速下运行,机组不带负荷,调整发电机转子电流使定子电压从零升到额定值,检查发电机各部位是否有异常情况。然后录制空载特性曲线,即发电机定子电压与转子电流的关系曲线。录制空载特性时,发电机转子电流达到额定值为限,此时定子电压约为1.3倍额定电压。对于有层间绝缘的定子绕组,当转子电流达到额定值时停留5min,进行层间绝缘耐压试验。发电机空载试验时还要进行测量表计、继电保护装置的电压回路检查,灭磁开关试验和单相接地试验并测量轴电压。

机组过速度试验 机组过速度试验是检查过速保护装置的动作值和机组本身在过速条件下的运行情况。过速度保护装置通常整定在比机组最大转速上升值的百分数加5%。过速试验用手动操作平稳地提高机组转速达到规定值后,立即将转速降至额定值。在过速度试验时记录机组各部摆度、温度和振动。试验完毕后停机检查机组的固定及转动部分有无异常现象。

机组空载下调速器和励磁装置的试验 机组空载运行下分别进行调速器和励磁装置的试验。试验的目的是在空载条件下检查调速器和励磁装置的特性和动态品质。调速器试验包括手动和自动切换试验、频率给定调整范围试验、空载扰动试验等。励磁装置试验包括起励试验、电压调节范围试验、手动和自动切换试验、空载扰动试验以及励磁调节器的频率特性试验等。

同步回路检查和试验 机组通常都装有手动准同步装置和自动准同步装置。同步回路检查是在发电机

空载时将发电机电压通过两组电压互感器接到手动准同步装置或自动准同步装置内,此时同步表或同步装置指示应正确,同时在两组电压互感器的二次侧检查相序并定相,证明同步回路接线正确。同步回路试验是在断路器断开的情况下将系统电压与发电机电压两个不同的电源引入手动准同步装置,此时同步表的指针将顺时针或逆时针方向旋转,表示机组的频率大于或小于电力系统频率。调整机组的频率和电压使之与电力系统的频率和电压基本相等,同步表的指针旋转趋慢,当接近同步点时,超前相角差大约相当于断路器合闸时间的相角差时,即可投入断路器与电力系统并网。试验自动准同步装置时可以用示波器录制示波图。

对于设计采用自同步方式并网的机组,还应进行自同步并网试验。试验开始时机组处于停机状态,然后自动开机,当机组转速对应的频率接近电力系统同步频率时,通过频率差继电器或转速继电器将断路器投入,然后合上励磁开关,机组即可拉入同步,可用示波器录制机组自同步过程主要参数的示波图。(见同步系统)

(王冰)

shuilun-fadianjizhu qidong shiyunxing

水轮发电机组起动试运行 (commissioning test of water turbine generator set)

通过试验确认水轮发电机组具备投入试生产的必要程序。水轮发电机组起动试运行分引水系统充水、水轮发电机组空载试验、水轮发电机组带负荷试验三个阶段。机组起动试运行的目的是对整个水电站建筑和水轮发电机组及其附属设备的安装工程,通过充水、起动和一系列试验并测定有关参数,进行全面质量检查。

机组起动试运行前应具备的条件 主要包括下列内容。

(1) 水电站的水工建筑物已基本完成,达到初期发电所要求的工程面貌,水库水位已超过最低发电水位。

(2) 引水系统(包括水电站进水口、引水明渠(管)、引水隧洞、调压室、压力管道等)已清扫干净,能满足过水要求;暂不使用的压力管道闷头已装好,尾水位以下厂房与尾水的连通管路已装设防止逆流的设施;闸门及启闭机已安装完毕,经调试可满足紧急关闭要求。

(3) 尾水闸门及其启闭设备已安装完毕,试验合格;厂内排水系统已安装完毕(见水电站排水系统),经试运行工作正常;尾水围堰及下游集碴已按设计要求清除干净。

(4) 水轮发电机组及其附属设备全部安装完毕,经调整试验和分部试运转合格;机组的公用系统和自

shui 水

动化系统已能满足机组试运行需要。

(5) 所有电气设备经检查试验合格,可以满足机组带负荷以及测量、监视、控制和保护等的要求。

(6) 有关操作油、压缩空气、供排水等附属设备系统,均能满足机组运转时的冷却、润滑、排水、操作和防火、防寒等要求;厂用电及直流系统已按设计要求安装完毕,供电电源安全可靠。

(7) 升压站、开关站等土建工程现场已清理并作好围栏,确保人身安全,并能保证高压电气设备的安全送电;对外必须的输电线路已经架设完成。

(8) 厂房土建工程已基本建成,能保证机电设备的正常运转;试运行机组段的厂房装修已基本完工;厂区防洪排水设施能保证汛期安全运行。

(9) 厂区照明、通信系统和对外通信已按设计建成,通信可靠。

(10) 电厂的生产准备工作已经就绪。

试验项目 水轮发电机组启动试运行的试验项目,通常只进行引水系统充水、机组空载试验、机组带负荷试验中所包括的试验项目。

新型号的机组在首次投入运行后还应进行型式试验。机组型式试验包括飞逸试验、温升试验,效率试验、参数测定、发电机出口突然短路试验、短时过电流试验、负序电流试验、零功率因数特性试验、飞轮力矩测定等。型式试验可在机组投入生产后进行。由于有些项目对机组具有一定的破坏性如飞逸试验、突然短路试验等,因此应得到制造、设计、运行、施工等部门同意后慎重进行。

(王 冰)

shuilun - fadianjizu tiaofeng

水轮发电机组调峰 (peak load regulation of water turbine generator set)

水轮发电机组对电力系统高峰负荷的需量迅速作出响应的一种运行方式。由于昼夜用电负荷的不均衡性,电力系统负荷曲线形成高峰及低谷,在高峰时,需要有机组解决高峰电力的需要,保证电力系统的供电质量。电力系统调峰机组,可以用水轮发电机组、燃气轮机组或汽轮发电机组,但以水轮发电机组最为经济合适,这是因为水轮发电机组具有开机停机简单迅速,增减负荷速度快,以及水电成本低廉的缘故。

20 世纪 60 年代以来,抽水蓄能电站的建设发展很快,其发电电动机组既能调峰,又能填谷,对电力系统负荷高峰低谷的调节,又多了一种手段,对于火电比重占绝对优势、水电不仅比重小、而且调节性能又差的电网,尤为重要。

抽水蓄能电站吸取夜间电力系统负荷低落时的剩

余电能进行抽水,使火电机组不必降低出力或部分停机,同时也改善了火电机组运行条件;在高峰时利用抽上去的水量来发电,以解决电力系统调峰的负荷需量。所以,以火电机组为主的电力系统,要解决系统调峰问题,一个有效的途径是建设抽水蓄能电站。

随着火电厂和核电站比重进一步增长,电力系统供电负荷率越来越低,电力系统在午夜以后,即使火电出力尽量压低,发电容量仍会超出电力负荷的需要,出现剩余电能,而高峰时又缺乏调峰电力,因此,更需要发展抽水蓄能电站与日益增长的火电厂和核电站配合运行。所以,在 70 年代后期至今,一些工业发达国家,如日本,随着高效率大容量火电机组的建设,以及核电站的发展,更加需要建设大型抽水蓄能电站进行调峰和填谷,根据日本研究,认为在以火电机组及核电机组为主的电力系统中,需要建设占电力系统容量的 10%~20%抽水蓄能电站与之匹配,是比较经济合理的。

(黄宝范)

shuilun - fadianjizu tiaopin

水轮发电机组调频 (frequency regulating of water turbine generator set)

水轮发电机组根据电力系统频率的变化随时调节其有功功率,以保持电力系统频率在合格范围内的一种运行方式。水轮发电机组具有调整有功功率迅速、范围大的优点,一般能在额定负荷的 50%~100%随时变动,因而水轮发电机组作为电力系统的调频运行机组,是其重要运行方式之一。

水轮发电机组作为调频机组,必须具有水库库容大、水库进水量丰富、机组容量大等条件。所以全部具有这些条件的可以作为常年调频机组,若只是季节性水量大,也可只作为季节性调频机组,而与大容量高效率火电机组共同对电力系统进行调频。

水轮发电机组调频操作可分为手动与自动两种:
①手动调频。靠电站运行值班人员,根据电力系统频率变化,随时调整水轮发电机组有功功率。
②自动调频。机组有功功率的调节自动受控于电力系统的频率进行升降,自动调频装置的基本功能是自动测量系统频率和给定值之间的偏差,根据偏差大小控制水轮机调速器的调速机构,改变机组的有功功率,以维持频率为给定值。当前,调频是与水电站计算机监控系统相联,按经济运行原则,在电站内机组间分配有功功率,以达到对电力系统进行调频的目的。

(黄宝范)

shuilun - fadianjizu tiaoxiang

水轮发电机组调相 (compensating oper-

ation of water turbine generator set) 水轮发电机组只发无功功率,并消耗电力系统有功功率的一种运行方式。水轮发电机组的转轮在空气中或在水中都可作调相运行,根据中国官厅及密云两个水电站机组实测资料,在空气中运行一般吸取电力系统有功功率为水轮发电机额定功率的3%;在水中运行,吸取电力系统有功功率为空气中运行的十倍左右,所以,多采取水轮发电机组的转轮在空气中作调相运行。

水轮发电机组作同步调相机运行时,先以水轮发电机运行方式投入电力系统,然后关闭水轮机导水叶,并把压缩空气通入水轮机室将水压下,使水轮机转轮在空气中运行,再凭借励磁调节作用(见水轮发电机励磁),向电力系统输出无功功率,起到调整电力系统电压的作用。在停止调相运行时,只要放出水轮机室压缩空气,水轮发电机组与系统解列,以水轮发电机组正常方式进行停机。

水轮发电机组进行调相运行的特点是起动快,消耗电力系统功率小,转换方式灵活。如果把水轮发电机组安装在负荷中心附近,作调相运行时效果则更好。

水轮发电机作调相机运行时,水轮发电机定子电流应降至相当于额定转子电流时的对应数值,此时额定功率因数为0.8的水轮发电机组,其定子电流大约降低20%。因此,机组调相容量的确定与额定功率因数有关,约为其额定容量的65%~80%。

(黄宝范)

shuilun-fadianjizhu tingji zhidong

水轮发电机组停机制动 (braking of water turbine generator set) 使机组在停机过程中缩短低转速惰行时间的技术措施。采用停机制动可以缩短机组停机时间,能有效地防止在低转速下水轮发电机推力轴承因油膜破坏而被烧损。常采用的有机械制动、电制动及混合制动等三种方式。

机械制动 水轮发电机组停机机械制动是当机组转速降到额定转速的20%~40%时,用0.5~0.7 MPa压缩空气顶起制动器的制动块,使之与固定在发电机转动部分上的制动环相接触,形成摩擦制动。常用的机械制动具有简单、通用性强等优点,但存在制动器动作不灵、制动块磨损快、制动环龟裂、维护工作量大以及噪声大等缺点。磨损产生的粉尘将污染绝缘,堵塞通风槽,严重时影响发电机的正常运行。改善措施有:①改进制动器结构和制造工艺,采用将顶起转子用的油管路和制动用的气管路分开的结构。②采用制动块具有可靠返回性能的制动器。③从结构上设密封罩和吸尘器。④在推力轴承结构设计允许条件下尽量降低投入机械制动时的转速。⑤改进制动环的材质。⑥改善

制动块的材质,使之不易产生粉尘等。机械制动方式在20世纪60年代以前均采用。

电制动 水轮发电机组停机电制动是在发电机定子外部三相短路条件下,转子回路输入恒定的励磁电流,利用定子绕组产生的能耗使机组制动停机。电制动可以通过定子三相直接短路、定子三相外接附加电阻短路、发电机变压器单元接线高压侧三相直接短路等方法实现,由于定子三相直接短路制动比较简单实用,故在20世纪60年代以后得到广泛应用。计算分析表明,电制动力矩 M 表达式为

$$M = \frac{I_b^2 r}{n[x_d^2 + (r/n)^2]} \quad (1)$$

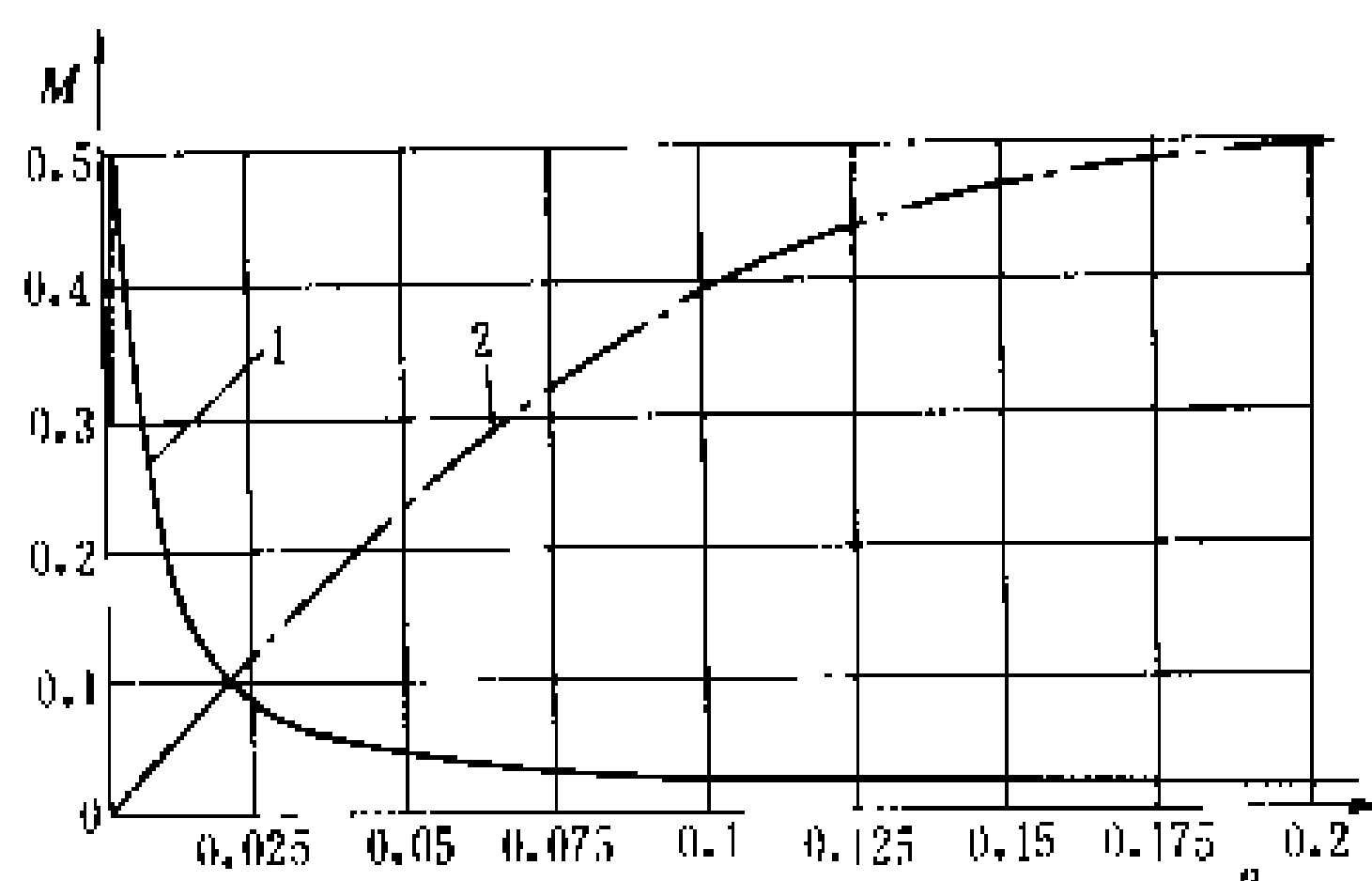
电制动力矩出现最大值时的转速 n_{\max} 为

$$n_{\max} = \frac{r}{x_d} \quad (2)$$

最大电制动力矩 M_{\max} 为

$$M_{\max} = \frac{I_b^2}{2x_d} \quad (3)$$

式中 I_b 为制动励磁电流; n 为机组转速; r 为定子绕组的有效电阻; x_d 为直轴同步电抗。式(1)、(2)中各量均为标么值。式中表明,电制动力矩随转速下降而增大,这对防止推力轴承烧损是有利的。当转速 n 下降至 n_{\max} 值时,电制动力矩达到最大值(如图曲线1所示),此时 $n_{\max} \approx 0.001 \sim 0.00125$ 。在定子出口外接附加电阻短路制动,则改变了制动特性,使最大电制动力矩出现时间向高转速区移动(如图曲线2所示),这对缩短制动时间是有效的,但却削弱了接近零转速区的制动效果。电制动具有制动力矩大、无磨损、无污染、维护工作量小等优点。电制动需要制动励磁电源及三相短路开关设备,增加了设备投资及布置场地,故仅用于起停频繁的调峰机组和蓄能机组。由于当发电机内部电气事故时不允许电制动投入,故在采用电制动时仍需保留机械制动。



电制动力矩特性

1 定子三相直接短路; 2 定子三相外接附加电阻短路

混合制动 水轮发电机组停机混合制动是由于机械



制动和电制动在特性上的差异，有时采用一种制动方式尚不能满足要求时，而采用由两种制动方式组合的制动方式。如在较高转速下（例如 50% 额定转速）先投入电制动，再在较低转速下（例如 5% 额定转速）投入机械制动。混合制动方式进一步缩短了停机时间，但增加了停机操作回路的复杂性。

（邱景安）

shuilun - fadianjizhu xiaoliu shiyan

水轮发电机组效率试验（efficiency test of water turbine generator set） 对水轮发电机组在水能转换成电能整个过程中的能量损耗或转换

效率的检测工作。据效率 $\eta = \frac{P_g}{9.81QH}$ 计算式，为求得在设计水头下各测点的效率值，需在某一稳定的试验水头下，对水轮发电机组的出力 P_g 、流量 Q 、水头 H 等进行同步实测，经分析计算可得出在实验水头下各测点的效率值。并将各实测参数换算为计算水头下的相应值。

试验目的 检验机组特性，标定流量计的流量系数，并获得导水叶空载开度和最大开度、空载流量和最大流量、最大出力和最高效率等特性参数。

（1）检验机组的出力和效率特性是否达到了制造厂的保证值，调整转桨式水轮机的协联关系使之达到最优。

（2）全面检验水轮发电机组及其附属设备的设计、制造和安装质量；确定在不同运行工况下，水轮机汽蚀、水压脉动、机组振动等对效率的影响，并找出效率下降的原因，以指导运行。

（3）标定蜗壳流量计的流量系数，以便在任何水头下能简便地测量通过水轮机的流量瞬时值，为制订机组、电站的经济运行方案提供实测依据。

试验内容及其方法

机组输出功率（ P_g ）的测量 包括双瓦特表法、三瓦特表法、电能表法等。

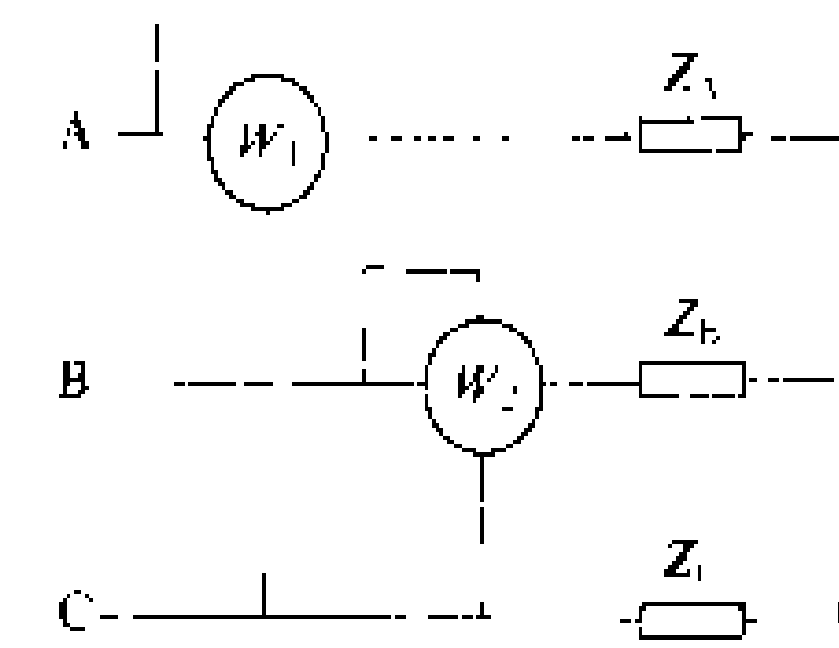


图 1 双瓦特表接线示意

功率用下式计算

$$P_g = CK_I K_V (\pm W_1 \pm W_2) / 1000 (1 + \Delta K)$$

式中 P_g 为发电机输出功率，kW； C 为瓦特表刻度常数； K_I 、 K_V 分别为电流和电压互感器的变比系数； W_1 、

W_2 分别为各瓦特表的读数； ΔK 为互感器的修正系数（包括比差和角差的综合修正值）。

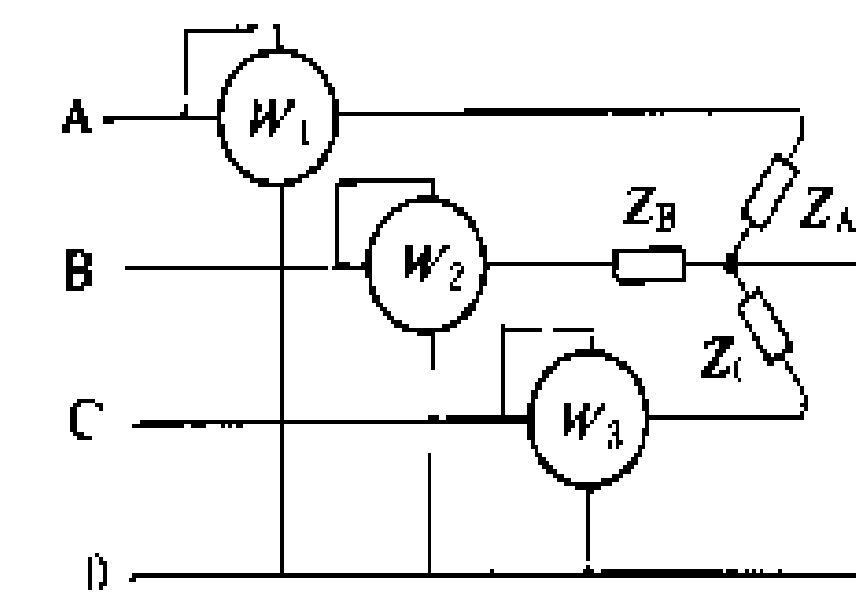


图 2 三瓦特表接线示意

计算

$$P_g = CK_I K_V (\pm W_1 \pm W_2 \pm W_3) / 1000 (1 + \Delta K)$$

W_3 为瓦特表的读数。

（3）电能表法。当功率波动较大，上述两种测试方法不适用时，才使用这种测量精度较低的方法。用 0.5 级的三相电能表和 0.1 级的秒表测量某一段时间 t 及其相应的电量 E ，则出力

$$P_g = \frac{E}{t}$$

机组流量（ Q ）的测量 包括流速仪法、水锤法、热力学法、超声波法、压差法等。

（1）流速仪法。适

用于明渠和封闭管道。把若干个流速仪布置在测流横断面的流速仪支架上，其测点的数目和间距均按国际电工委员会（IEC）的有关规定选定。用图解积分法对各测点流速沿测流断面面积分，即可求出通过该断面的流量。封闭管道的圆形过流断面的流量计算见图 3，按下式计算

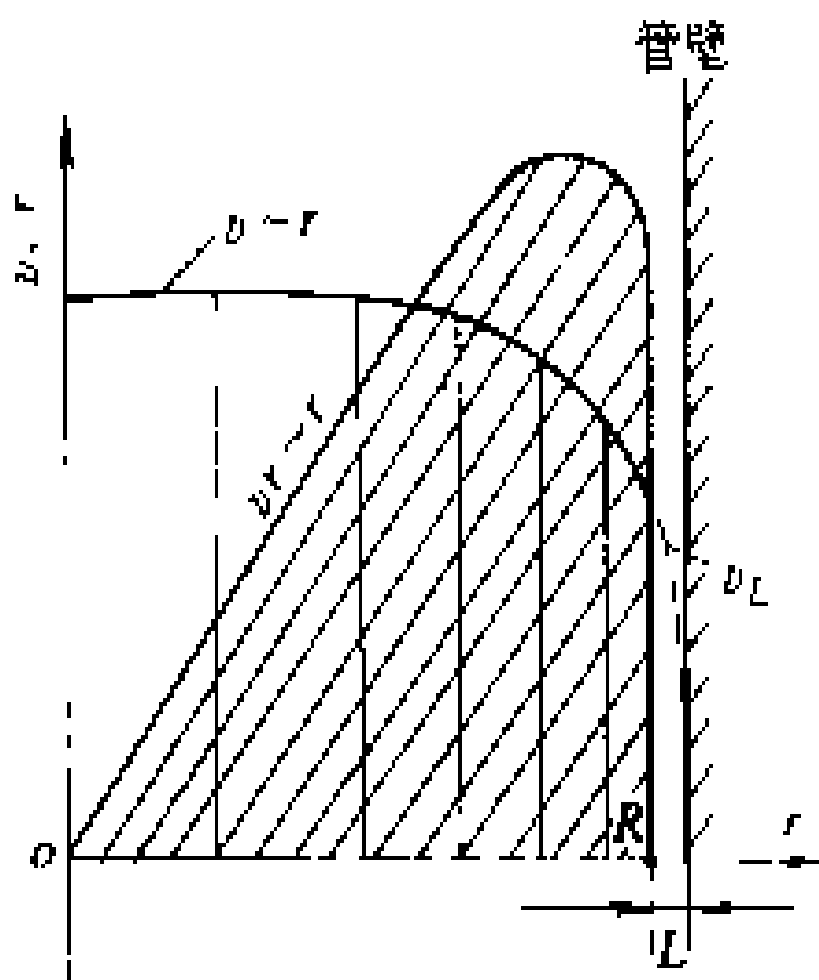


图 3 圆断面的图解积分法
过该断面的流量。封闭管道的圆形过流断面的流量计算见图 3，按下式计算

$$Q_0 = 2\pi \int_0^R v r dr$$

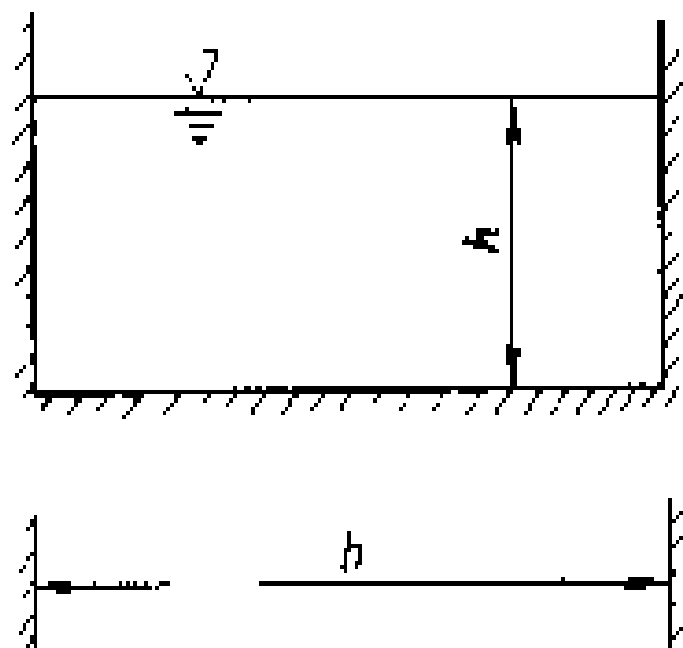


图 4 矩形或梯形断面时的图解积分法示意图

计算

$$Q_0 = \int_0^h db \int_0^b v db$$

式中 Q_0 为自圆心至测点范围内测流断面的流量， m^3/s ； R 为靠近边壁的测点的半径，m； v 为各测点的流速，m/s； r 为各测点的半径，m。

矩形或梯形断面时的流量计算见图 4，按下式

式中 Q_0 为施测点范围以内测流断面的流量, m^3/s ; h 为测流断面的高度或水的深度, m ; b 为测流断面两边壁施测点之间的宽度, m 。

对以上两种型式的断面,其边缘区域流速的计算,可按式计算。

$$v_x = v_L \left(\frac{L_x}{L} \right)^{1/7}$$

式中 L 、 v_L 分别为靠近边壁的测点离边壁的距离和该测点的流速, m 、 m/s ; L_x 、 v_x 为边缘区域内某测点离边壁的距离和该测点处的流速, m 、 m/s 。已知边缘区域的流速分布规律后,即可按不同断面型式相应的积分法,求算边界层的流量 ΔQ 。通过机组的总流量 $Q = Q_0 + \Delta Q$ 。

(2) 水锤法。适用于封闭管道的流量测量。当水轮机导水叶快速关闭时,水流速度减小,水流的动量转变为冲量,使管道内的水压升高,记录导水叶关闭前、后的压力和快速连续关闭过程中压力随时间的变化过程,来求机组流量。为提高测量精度,一般取两个断面进行压力差值的测量见图 5,按下式计算

$$Q = \frac{Fg}{L} \int_{t_1}^{t_2} \frac{\Delta p}{\gamma_0} dt + q_0$$

式中 F 为测量管段的断面面积, m^2 ; g 为当地的重力加速度,一般取为 9.81m/s^2 ; L 为选定的两个测流断面之间的管道长度, m ; t_1 为导水叶开始关闭时刻, s ; t_2 为导水叶关闭终止时刻, s ; Δp 为每一瞬间两个测流断面间的压力差值, $9.8 \times 10^4 \text{Pa}$; γ_0 为水的重度, N/m^3 ; q_0 为导水叶的漏水流量, m^3/s 。

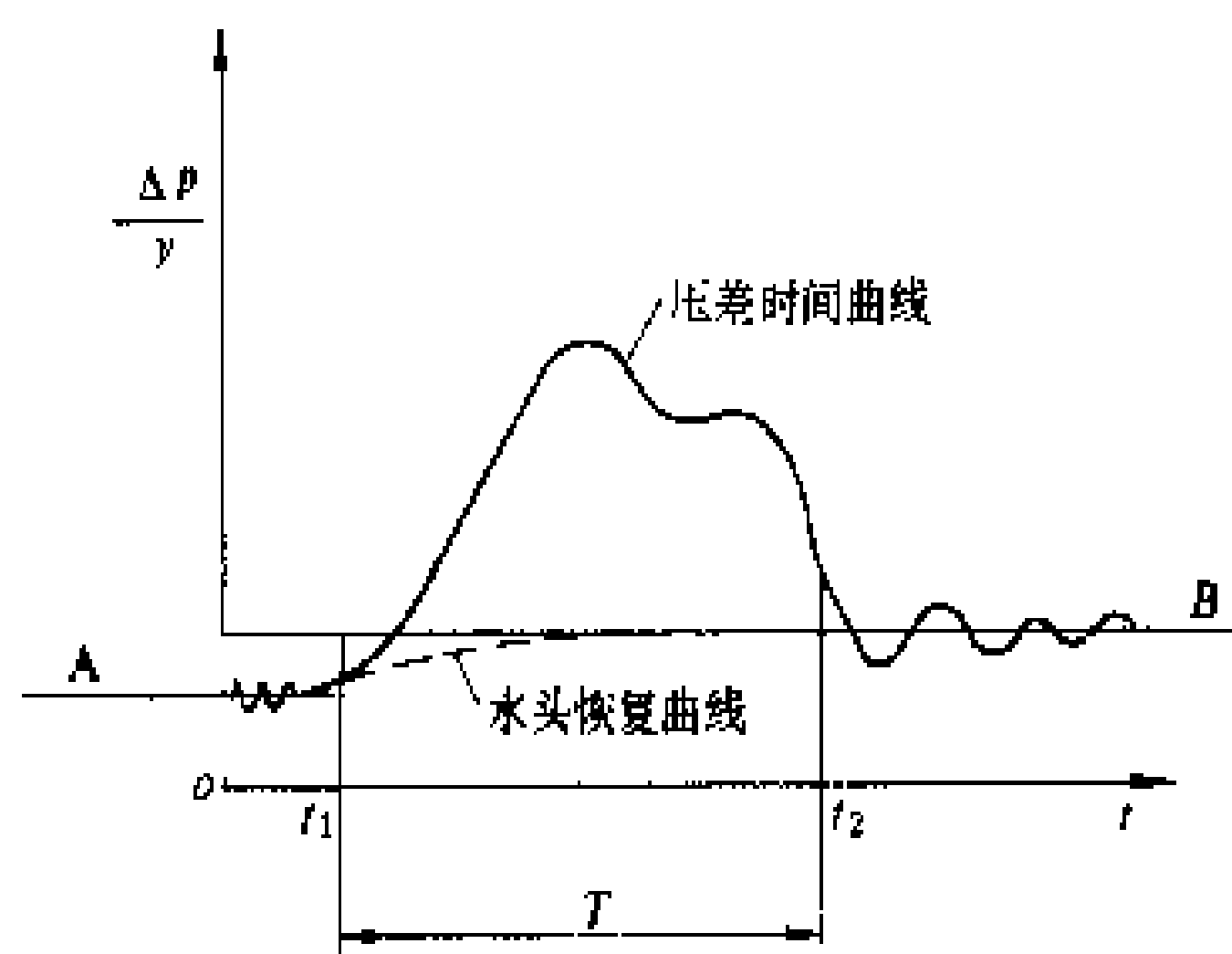


图 5 水锤法压差示波示意

导水叶漏水量的测量。通常采用容积法测量该流量,即在导水叶关闭情况下再关闭压力钢管入口工作闸门,用标准压力表测出该管段在时间 t 内的水位降低值 h_0 ,利用下式计算总漏水量

$$q_1 = \frac{Fh_0 \left(1 + \frac{1}{i} \right)^{1/2}}{t}$$

式中 q_1 为包括压力钢管入口工作闸门漏水量在内的

总漏水量, m^3/s ; F 为钢管截面积, m^2 ; i 为钢管段的坡度。然后关闭尾水闸门,利用检修用排水泵,将蜗壳和尾水管内的积水排入集水井,实测钢管入口工作闸门的漏水量 q_2 ,故导水叶实际漏水量为 $q_0 = q_1 - q_2$ 。考虑到 q_0 是在工作闸门关闭后即水头较低的情况下测得的,需换算到效率试验时所选定的计算水头 H_p 下的导水叶漏水量 $q = q_0 \left(\frac{H_p}{H_0} \right)^{1/2}$,式中 H_0 为测定 q_0 时所对应的平均水头。

(3) 热力学法。该法适用于 150 m 以上的水头时的水轮机测流,220 m 以上扬程时的水泵测流。可在电站不停机、不停水的情况下直接测出水轮机和水泵的效率,然后也可根据实测参数进行效率计算。该方法要求环境热量稳定和高精度的测试仪器设备。

$$\eta_h = \frac{e_m - e_x}{e_h}$$

$$\eta_p = \frac{e_h}{e_m + e_x}$$

$$e_h = \bar{\gamma}(p_1 - p_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g(Z_1 - Z_2)$$

$$e_m = \bar{a}(p_1 - p_2) + \bar{C}_p(T_1 - T_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + (Z_1 - Z_2) + \Delta e_m$$

$$\Delta e_m = \frac{\bar{\gamma}}{Q_e} WA(T_s - T_0)$$

式中 η_h 、 η_p 分别为水轮机效率、水泵效率; e_h 为单位质量的水能; e_m 为单位质量的机械能; e_x 为相应于收缩损失的单位质量的能量; Δe_m 为由于二次热交换损失的修正值; $\bar{\gamma}$ 、 \bar{a} 、 \bar{C}_p 分别为每单位质量水的体积、等温系数、水比热的平均值,在 IEC 规程中均有附表可查; p 、 v 、 Z 、 T 分别为压力、流速、测点高程和温度,其脚标 1、2 分别为进口和出口; Q_e 为流量, m^3/s ; W 为交换功率, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; A 为热交换面积, m^2 ; T_s 为环境空气温度, $^\circ\text{C}$; T_0 为水轮机中的水温, $^\circ\text{C}$ 。

(4) 超声波法。超声波在流体介质中传送时,相对于固定坐标系,其差值与介质的平均流速成线性关系。在具体测量中根据超声波在顺、逆流传播时,其速度变化的时间差、相位差和频率差而有相应的测流方法,其中以时间差法具有测量精度高、干扰小、使用方便等优点而被广泛采用,见图 6,按下式计算

$$v = \frac{c^2}{2L \cos \theta} \Delta t$$

式中 v 为流体的平均流速, m/s ; c 为超声波在该流体静止时的声速, m/s ; L 为超声波发射器与接收器之间的距离, m ; θ 为声道与液体流向之间的夹角, $(^\circ)$; c 、 L 、 θ 等均可事先测出,试验时只要实测时间差 Δt 即可求出 v ,再乘以测流断面面积即可求出流量。



(5) 压差法。这是一种相对测流方法。流道中两点的

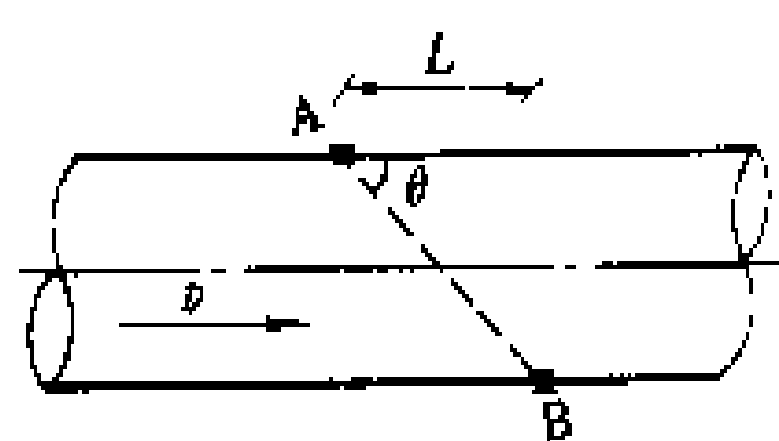


图6 超声波法测流示意
(单声道布置)

的压力差与通过的流量之间存在固定的函数关系,只要测量断面和高、低压测孔的位置不变,则系数 K 和指数 n 将不受水头或导水叶开度变化的

影响,即

$$Q = K \Delta h^n$$

式中 K 为常数, Δh 为两测点之间的压力差, n 为指数。该方法需在某种绝对测流方法实测流量的同时,测取压力差值 Δh 以标定 K 和 n 值。压差法测小流量时多用文丘里管或孔口流量计,测大流量时需用蜗壳或尾水管肘管压差计,可随时测取运行中水轮机或水泵的过流量。

机组水头(H)的测量 包括水位测量、水压测量、水头计算等。

(1) 水位测量。水位测量装置的种类很多,对于水位波动的水面,为提高测量精度,以浮子水位计为好。对施测点海拔高程的测量,采用与水准点的高程差进行测算。

(2) 水压测量。原型机组效率试验中宜采用 0.2 级标准压力表和压力传感器同步进行水压测量,并将压力传感器信号输入示波器或计算机。

(3) 水头计算。水轮机工作水头 H 为水轮机进口与尾水管出口断面总能量之差,根据各工况点时实测的水位、水压和流量,对不同型式的水轮机进行水头计算。

$$\text{混流式 } H = A_1 - A_2 + 10(p_1 - p_2) + \frac{a_1 v_1^2 - a_2 v_2^2}{2g}$$

$$\text{轴流式 } H = B_1 - B_2 + \frac{a_1 v_1^2 - a_2 v_2^2}{2g}$$

$$\text{冲击式 } H = \Delta L + 10p_1 + \frac{v_0^2}{2g}$$

式中 A_1 、 A_2 分别为蜗壳进口和尾水管出口处压力表中心的海拔高程, m; p_1 、 p_2 分别为上述两测断面处的压力表读数, $9.8 \times 10^4 \text{ Pa}$; v_1 、 v_2 为两侧断面处的水流的平均流速, m/s; a_1 、 a_2 为流速分布不均匀系数,按 IEC 规程的规定可取 a_1 、 a_2 均等于 1; g 为当地的重力加速度; B_1 、 B_2 分别为进口闸门后和尾水管出口处的水位, m; ΔL 为测压计中心与转轮节圆最低点的高程差, m; v_0 为喷嘴进水管断面的平均流速, m/s。

试验成果与误差分析

• 406 •

(1) 效率计算。机组的各动力特性均指对某一固定水头而言,根据试验目的在试验时均预先确定某个特征水头(如最大、设计、最小水头等)作为试验水头。但效率试验时段内,由于上、下游水位和各工况点流量的变化,使对应工况点的实际水头值亦发生相应的变化,与试验水头之间将产生差异。因水轮机特性随水头而变化且为非线性关系,为检验保证性能,需从实测水头中选取一个与额定工况或最优工况相近的计算水头 H_p ,并使之与半数以上负荷点的实测水头 H_i 之差在 $\pm 2\%$ 以内,再根据相似理论,将各工况点的实测功率、实测流量均换算到计算水头 H_p 时的相应值,换算式为

$$P_p = P_i \left(\frac{H_p}{H_i} \right)^{3/2}$$

$$Q_p = Q_i \left(\frac{H_p}{H_i} \right)^{1/2}$$

式中 P_i 、 Q_i 、 P_p 、 Q_p 分别为实测功率、实测流量、换算功率、换算流量。用下式计算机组的效率

$$\eta = \frac{P_p}{9.81 Q_p H_p} 100\%$$

(2) 试验成果。通过机组效率试验可获得下列工作特性曲线:如功率特性曲线,见图 7(a);流量特性曲线,见图 7(b);导水叶开度特性曲线,见图 7(c)。图中 η 、 Q 、 q 、 P_g 、 Δh 、 ΔH 、 a 分别为机组效率、流量、耗水率、发电机输出功率、蜗壳压差、引水系统的水头损失和导水叶开度。

(3) 误差分析。

机组效率的综合误差

$$f_\eta = \pm (f_p^2 + f_Q^2 + f_H^2)^{1/2} \text{ 为 } \pm (1.0 \sim 2.5)\%$$

有功功率的测量误差

$$f_p = \pm (f_w^2 + f_i^2)^{1/2} \text{ 为 } \pm 0.8\%$$

式中 f_w 为功率表的误差; f_i 为互感器误差。

流量的测量误差:对流速仪法时的封闭管道, $f_Q = \pm (1.5 \sim 2.0)\%$;对流速仪法时的明渠, $f_Q = \pm (1.0 \sim 2.0)\%$;对水锤法测流时, $f_Q = \pm (0.7 \sim 1.5)\%$;对热

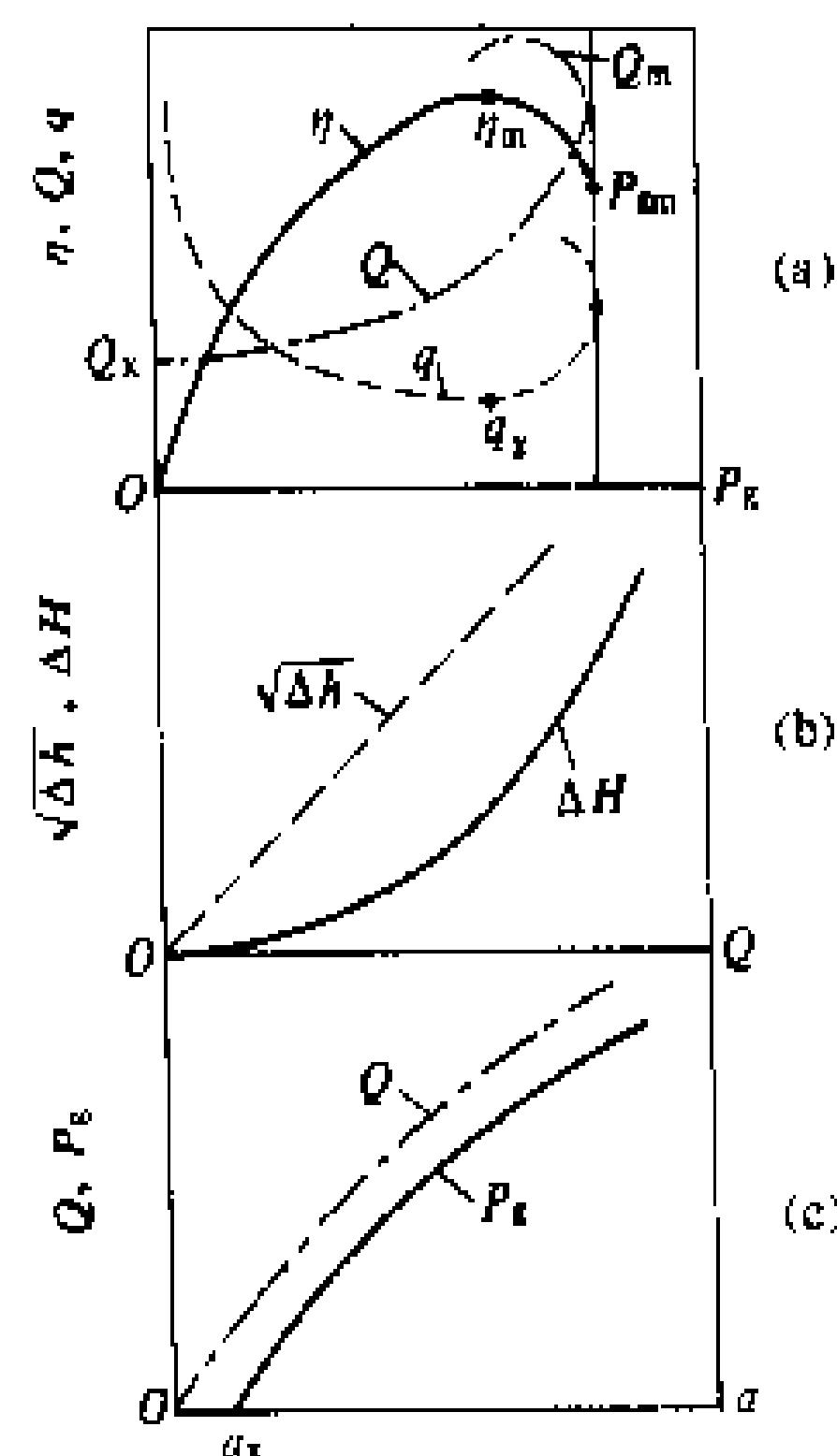


图7 工作特性曲线示意

(a) 功率特性曲线 η 、 Q 、 $q =$

$f(P_g)$; (b) 流量特性曲线 $\sqrt{\Delta h}$ 、

$\Delta H = f(Q)$; (c) 导水叶开度特性

曲线 Q 、 $P_g = f(a)$

力学法测流, $f_Q = \pm (1.0 \sim 2.0)\%$; 对超声波法测流, $f_Q = \pm (1.0 \sim 1.5)\%$ 。

水头的测量误差

$$f_H = \frac{f_h h + f_p \frac{p_0}{\gamma_0}}{H_0} \%$$

式中 f_h 为水位测量误差, %; h 为水位计最大量程, m; f_p 为压力测量误差, %; p_0 为压力计的最大量程, 9.8×10^4 Pa; γ_0 为水的重度, N/m³; H_0 为试验水头, m。

(刘丽秉)

shuilun - fadianjizu zhendong

水轮发电机组振动 (vibration of water turbine generator set)

水轮发电机组各构件在运行中将会产生周期性或非周期性的振动, 振动的大小取决于不同工况下过流通道内的流态、机组结构特性、安装和维修的质量以及电磁不平衡程度等。振动是旋转机械不可避免的现象, 若能将其振幅值限制在允许范围内, 则对机组正常运行并无妨碍。但经常性的较大振动将危及机组安全, 例如: ①使机组各部件之间的联接松动, 振动严重时使机组不能稳定运行。②引起零部件或焊缝的疲劳, 形成并扩大裂缝甚至断裂。③使各转动部件与静止部件之间产生磨损而导致损坏。④尾水管中形成涡带后引起低频水压脉动 (见水轮机水压脉动), 可使尾水管壁产生裂缝; 当其频率与发电机或电力系统的自振频率接近时, 将发生共振现象, 引起机组出力的大幅度波动, 可能使机组从电力系统中解列甚至危及整个厂房。

振动原因 引起水轮发电机组振动的主要原因可归纳为水力、机械、电气等三个方面。

(1) 水力因素。水轮发电机组以水轮机为原动机, 水的能量是直接或间接激发或维持机组振动的最根本的缘由。水力振动的突出特征是带有随机性, 且当机组处在非设计工况或过渡工况运行时, 因水流状况恶化, 机组各部位的振动亦明显增大。由于单位体积水流的能量取决于水头, 所以机组的振动水平一般是随水头的降低而减弱, 高水头、低负荷时的机组振动相对而言较为严重。

(2) 机械因素。由机械缺陷或故障引起的各种形式的振动, 其共同的特征是振动频率等于机组的转动频率或整数倍的机组转动频率。机组低转速时有较大的振动, 并伴有响声。

(3) 电气因素。按振动频率可分为转频振动和极频振动。由转子主极磁场对定于几何中心不成轴对称时所引起的转频振动, 其频率为机组转速频率或整数倍机组转动频率, 由定子分数槽次谐波磁通势、并联支

路内环流产生的磁通势和负序电流的反转磁通势等引起的极频振动, 其频率主要为 100 Hz。

振动试验 对机组在不同工况运转时进行振动测试, 根据实测资料来判别引起机组振动的具体原因。

(1) 空载无励磁变转速试验。当各导轴承处的振幅值随机组的转速升高而增大, 且振动频率等于转速频率时, 则机组的振动是由转动部分的质量不平衡所引起。当其振幅与转速无关, 而频率则为导水叶数或推力瓦数与转速频率的乘积时, 则振动为大轴轴线弯曲、导轴承或推力轴承调整不良、中心不正以及推力头松动等引起。

(2) 空载变励磁电流试验。各导轴承径向振幅随励磁电流的增加而增大, 且在不同方位上有明显的差异, 其振动频率等于整数倍机组转动频率, 则机组振动是由电磁力不平衡所引起。

(3) 变负荷试验。在同步转速下逐级改变发电机负荷, 分析 100 Hz 频率的振动随定于电流变化的情况, 由此确定振动是否由定子电流次谐波所引起。如当水轮机导轴承摆度随负荷或导水叶开度的增加而增大, 其振动频率等于轮叶数或导水叶数与转动频率的乘积, 且在调相压水后机组振动明显消失时, 则可证实机组振动是由水力不平衡所引起。当机组在某一负荷区域运行时, 若各部位的振动均较大、其振动频率等于 0.2~0.5 倍的机组转动频率时, 且同时在尾水管、蜗壳、顶盖等处均出现剧烈的水压脉动并伴有强烈的噪声时, 皆由于尾水管内产生空腔汽蚀且中心涡带不稳定所致。

(4) 调相试验。由发电转调相, 转轮室压水后, 若机组振动没有明显减小时, 则振动是由机械或电磁力不平衡所引起。

振动的测量 包括测量内容与方法、测点布置、测量仪器及测量成果等。

(1) 测量内容与方法。表征振动的三个最基本量为位移、速度、加速度, 它们分别与低频、中频、高频时的振动强度成正比。而表征这些基本量的参数则可用振幅、频率、相位角以及由它们构成的振动图形、振型等来表示。振幅的大小表示振动的严重程度, 频率表示振动的规律, 相位角或相位差表示激振力与响应之间的相位关系。振动图形为显示在示波器或其它记录器上的振动原始图形, 一种为时基形式即振动波形图, 另一种为轨迹形式即显示某处质点运动的轨迹, 通过振动图形可确定振动的幅值、频率和相位角。振型则显示振动体振动时的空间形状, 它可以确定振动体的动态特性、节点或节线的位置和数量。

(2) 测点布置。各导轴承处的大轴摆度, 导轴承座及其支架的水平振动, 推力支架、顶盖等处的垂直振



动,尾水管壁的水平振动,水轮机过流通道中各有关部位的水压脉动以及与运行工况有关的参数,根据机组型式和试验目的来确定必要的测点。如研究尾水管内涡带引起机组振动的试验,可重点测量尾水管、涡壳等处的水压脉动、水轮机导轴承处轴的摆度和该轴承座的水平振动。

(3) 测量仪器。测振系统包括传感器、放大器及分析记录仪器三个基本部分。振动传感器多用电阻式或电涡流式。相应的测量放大器如动态应变仪、前置放大器。记录器如光线示波器、磁带记录仪及以计算机为中心的数据采集系统和外部设备。

(4) 测量成果。试验成果分析最基本内容是确定振动量的最大幅值、主要谐波分量的频率及相应幅值、不同振动量之间的相互关系等,据此判断振动水平、确定振动原因、分析振动系统的动态参数等。

改善振动的措施 根据不同振因,采取不同措施。

(1) 对由于水力因素引起的振动,可向顶盖下方或向尾水管直锥段补入适量的空气,进行消振试验。

(2) 对由于质量分布不均匀和转子体作弓状回旋引起的振动,需重新盘车找中心或用配重的方法加以改善。

(3) 对子因磁力不平衡引起的振动,除检查并消除各电气构件的合缝或间隙缺陷外,也可借配重方法来削减振动值。

(4) 对机组结构或其它机械因素引起的不平衡,如用配重方法解决不了时,则应消除其本身的缺陷。

(刘丽果)

shuilun - fadianjizu zhouxian tiaozheng
水轮发电机组轴线调整 (shaft line alignment of water turbine generator set)

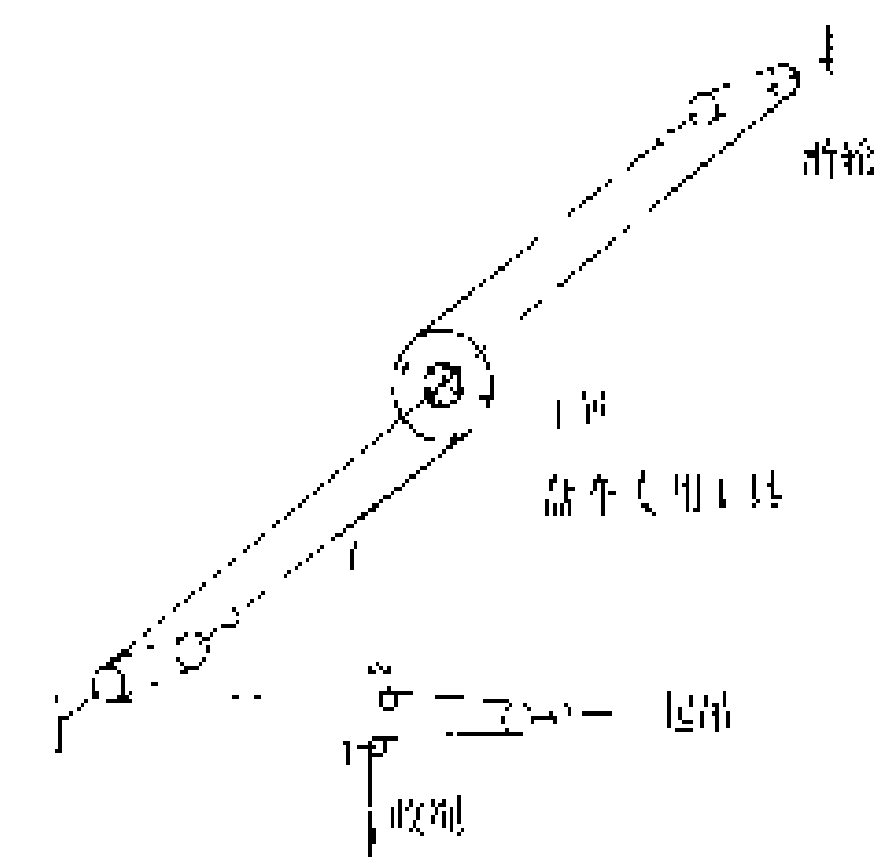
调整机组主轴线与机组的旋转中心线基本重合的工作。目的是为了保证机组的旋转部分主轴线与旋转中心线基本重合一致,防止机组运转中出现较大的摆度。水轮发电机组的主轴,根据其构造不同有三种型式:①发电机转子与水轮机的转轮同装在一根轴上。②发电机轴与水轮机轴连接而成。③除水轮机主轴、发电机轴外,还设有中间轴。除了第一种情况外,其它两种情况在组装过程中均需进行轴线的检测与调整。

导致水轮发电机组主轴联接后出现曲折,引起摆度大的因素可能有以下几点:①推力头对主轴的配合松、卡环的厚薄不均匀引起。②主轴本身弯曲。③推力头底平面与轴线不垂直,包括绝缘垫(指推力头与镜板之间的绝缘垫板)的厚薄不均匀,镜板的加工精度不高。④联轴法兰加工面对主轴线不垂直。前面两条为制造问题,需进行加工处理,后两条虽然也关系到制造加

工,但可通过调整处理解决。

轴线检测方法 进行水轮发电机组轴线检查,需要使机组转子回转,即需要进行盘车来检测主轴不同位置的摆度,取得具体摆度数值,作为调整的依据。盘车可以采用人力手动、机械(起重机、卷扬机)、电动等方法。①人力手动盘车只用在小型机组上,安装好盘车工具后用人力推动使机组转子回转检测其摆度。②机械盘车布置如图示,为使用主厂房起吊设备进行盘车,利用厂房上、下游墙上预埋的吊环挂上滑轮,在机组转子轴头安装专用盘车工具,用钢丝绳牵引盘车,再通过千分表测量出上部导轴承、主轴法兰盘、水轮机导轴承三部分的各位置位移值,计算出主轴的摆度值,进行调整处理使其符合于规定值。中国规定应满足GB8564-88《水轮发电机组及其附属设备安装技术规程》中的规定要求。③电动盘车为在发电机的定子和转子上分别通入直流电源,对定子进行分相通电,使定子与转子产生一个随定子分相电流转移的电磁力矩,当电磁力矩大于转子的摩擦力矩时,转子即随定子分相电流的切换顺序而转动,其方向与定子通入电流顺序方向一致。同样按照机械盘车中的要求,设置千分表测定主轴三个部位在转动中各位置位移值,计算摆度值,进行调整,使其符合规程规定。

轴线调整方法 用盘车的方法测定水轮发电机组



机械盘车布置示意图

主轴摆度和调整轴线的工
作,一般分两
步(如果有中
间轴时分为三
步)进行,即先
对发电机进行
单独盘车,测
量调整合格
后,再组合水
轮机联轴进行

机组整体盘车测量并进行调整。消除摆度过大的方法分别有研刮推力头、研刮推力头与镜板之间的对开绝缘垫板以及主轴法兰盘的组合平面等,同时也可以在推力头下或法兰盘结合面间加设金属薄垫片调整。如采用加垫片时不宜太厚,也就是说当摆度值较大时,最好采取修刮的方法来处理。

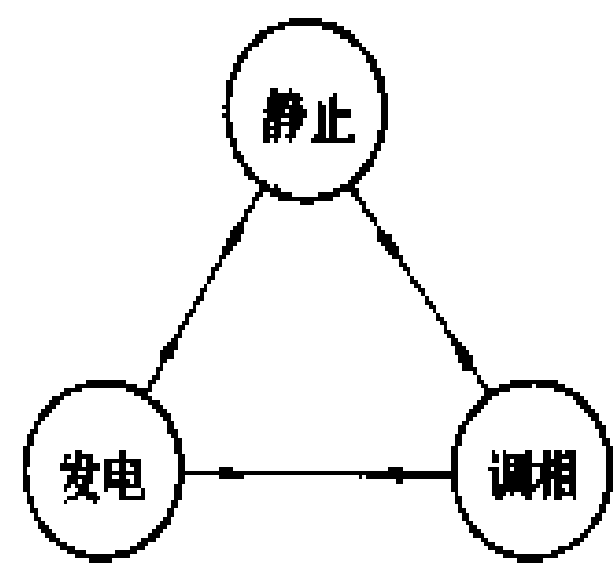
(杨承沪)

shuilun - fadianjizu zidong kongzhi
水轮发电机组自动控制 (automatic control of water turbine generator set)

对水轮发电机组工况及其转换过程自动监控的技术。以自动监控

装置为核心,通过水轮机调速器、励磁调节器、自动化元件和机组辅属设备,根据控制指令自动完成机组工况转换、安全监视和保护。自动监控装置可由有触点的继电器组成,也可以由无触点的逻辑元件组成,近年来已使用微机系统或可编程序控制器来完成自动监控任务。控制机组的指令,可来自上级调度所,也可来自电站内部最优负荷分配装置或低频启动装置;或者由运行人员手动给定。机组工况有静止、发电、调相三者之间的相互转换,如图所示。

静止转发电 当具备开机条件时,给处于静止状态的发电机组发出开机指令,机组即按既定程序将其辅属设备逐一投入工作,并将调速器的开度限制机构打开到启动开度位置,逐步打开水轮机导水叶,水便流向转轮,水轮机带动发电机转动,最后与电力系统同步并列(见同步系统),机组投入电力系统后,开度限制机构打至全开,机组按预先给定值带上负荷。



水轮发电机组工况
转换示意图

发电转调相 给处于发电运行的发电机组发出控制指令后,首先通过调速器的转速调整机构使机组减负荷至空载。同时将开度限制机构关至全关位置,关水轮机导水叶,机组转入调相运行,此时机组从电力系统消耗有功功率,送出无功功率。为了减少水阻力引起的损耗,向转轮室送入压缩空气压水,使转轮脱离水而在空气中旋转。

调相转发电 给处于调相运行的发电机组发出指令后,先将开度限制机构打开至启动开度,使调相有关控制回路解除,停止往转轮室补气,开度限制机构打至全开位置、机组带上预先给定的负荷,转为发电运行。

发电转静止 此工况转换有正常停机和事故停机两种。①正常停机时,先减负荷至空载,以减轻对电力系统的扰动。导水叶关至空载后,随即跳开发电机断路器,与电力系统解列,并由开度限制机构将导水叶关至全关。机组开始减速。转速下降到预先的整定值投入制动装置,迫使机组转速继续下降至全停。稍后,机组的所有辅属设备恢复到开机前准备状态。②事故停机时,为了减轻设备损坏程度,水轮发电机组立即与电力系统解列甩掉全部负荷并进行停机。除超速保护以外的其他机械事故也有采取先卸负荷,后与电力系统解列的作法。

静止转调相 机组处于准备开机状态,给以调相运行控制指令后,先按静止转发电的控制程序启动,与电力系统并列。此后,开度限制机构关至全关位置,导

水叶关闭,机组转入调相运行,并将压缩空气送入转轮室压水至转轮以下。

调相转静止 给调相运行的发电机组发出控制指令后,首先将开度限制机构打开至启动开度,停止供气,使机组转为发电运行,然后跳开发电机断路器,并使开度限制机构关至全关,导水叶关闭,机组转入停机过程。

安全监视和保护 水轮发电机组的轴承过热、调速器油压装置油压事故下降、机组超速、发电机电气事故、轴电流过大、水润滑橡胶轴承的润滑水中断等事故均需事故停机。其中机组超速和事故停机过程中导水叶剪断销剪断,尚需关闭水轮机前的阀门或快速闸门。

轴流式水轮机事故甩负荷,经常发生转动部件抬起的抬机现象,使机组受到不同程度的损坏。为了防止抬机,常采用导水叶两段关闭的措施,第一段急速关闭,第二段慢速关闭。在大、中型水电站中,已广泛采用超速限制器,作为水轮发电机组甩负荷而调速器失灵时防止机组飞逸的保护,在调速器拒动情况下迅速切换油路,封闭来自调速器主配压阀的油路,将压力油直接导至接力器的关闭侧,关闭导水叶。

水轮发电机组各轴承及冷却器温度升高、轴承油槽及油箱油位不正常、轴承冷却水中断、轴电流增大、水轮机顶盖水位过高、水导轴承密封水压力降低、剪断销剪断、调速器电气部分故障、控制电源中断、开机和停机过程未完成等异常情况发生时,发出报警信号。

国外许多无人值班的水电站,运行人员远离电站,发生异常情况得不到及时处理,有些异常情况如控制电源中断等也作用于停机。

(张德平)

shuilunji

水轮机 (water turbine; hydraulic turbine)

将水流的位能和动能转变为旋转机械能的水力机械。在水电站中水轮机带动发电机,把水流能量最终转换为电能,这套设备称为水轮发电机组。兼有水泵功能的水轮机称为水泵水轮机。它与抽水蓄能发电电动机联接,可以发电或抽水,整套设备称为抽水蓄能机组。将水轮机直接与水泵连接,由水轮机驱动水泵,称为水轮泵。

类型 根据水流通过转轮时能量转换的方式,水轮机可分为冲击式水轮机和反击式水轮机两大类。水流以速度水头的形式作用于转轮,将动能转换为旋转机械能的水轮机称为冲击式水轮机。其转轮上的水斗或轮叶受到由喷嘴射出水柱的冲击而使转轮旋转,转轮是在空气中工作的。冲击式水轮机根据射流进入转

轮的方向不同而分为切击式(水斗式)、斜击式、双击式三种,切击式一般用于 500 m 以上的高水头电站,斜击式和双击式水轮机则多用于小型水电站。

在反击式水轮机中,水流以压力能和动能在转轮流道内被转换为机械能,转轮是全部浸没在水中的。反击式水轮机根据水流通过转轮时相对于转轮轴的方向分为混流式水轮机、斜流式水轮机、轴流式水轮机和贯流式水轮机,反击式水轮机用于 700 m 以下水头的水电站,是应用最广泛的一种水轮机。

特性 水轮机的水力性能随运行工况不同而有变化。表示水轮机在各种工况下的流量、出力、转速和效率的性能叫作能量特性;反应在各种工况下汽蚀发展程度的性能叫作汽蚀特性,用汽蚀系数来表达,表现作用在转轮叶片和导水叶上的水压力以及水力矩的特性称为力特性;当水轮机甩去全负荷,而导水机构又失去控制,水流能量使机组转速上升到某一稳定转速的特性称为飞逸特性;水流流经水轮机转轮和过流部件引起的水压脉动及其频率是评价水轮机运行稳定性的指标,称为稳定特性。这些性能是判断水轮机技术水平和安全运行的指标,一般通过水轮机模型试验来取得。随着近代计算机技术的发展,通过计算也能定量地求得各种运行特性的某些参数。

主要结构 反击式水轮机的主要部件有蜗壳、座环、导水机构、转轮、主轴、导轴承及尾水管等,见图 1。①蜗壳。用于把从引水管引来的水流沿圆周方向均匀导向转轮,使水流形成环量。其外形近似于蜗牛,故名蜗壳。②座环。它是传递上部混凝土、水轮发电机和轴向水推力的全部荷载到厂房基础的支撑部件。③导水机构。其主要作用是靠改变导水叶间的开度来调节流量,从而调节机组出力;在紧急情况下导水机构快速关闭导水叶,使机组停机。导水叶由水轮机调速器通过压力油操作。④转轮。它是将水能转变为机械能的核心部件。混流式水轮机转轮一般由上冠、下环和叶片组

成;轴流式水轮机转轮则由上冠、轮毂和叶片组成,没有下环。轴流式水轮机的叶片为固定的(包括停机后可以调节叶片的)称为定桨式,轮毂内有传动机构可以随运转工况转动叶片的叫转桨式。转轮流道和叶片是决定反击式水轮机运行效率及性能的关键。⑤尾水管。又称吸出管,是连接水轮机转轮与下游水面的泄水部件,用以回收转轮出口的部分动能,提高水轮机的总效率。尾水管的型式与尺寸是决定厂房开挖尺寸的主要因素之一。⑥主轴。水轮机主轴是用于传递转轮的旋转力矩到发电机转子的部件。水轮机导轴承保证各转动部分与固定部分之间有适宜的间隙。导轴承一般采用油润滑,水质很好的电站也可采用水润滑。

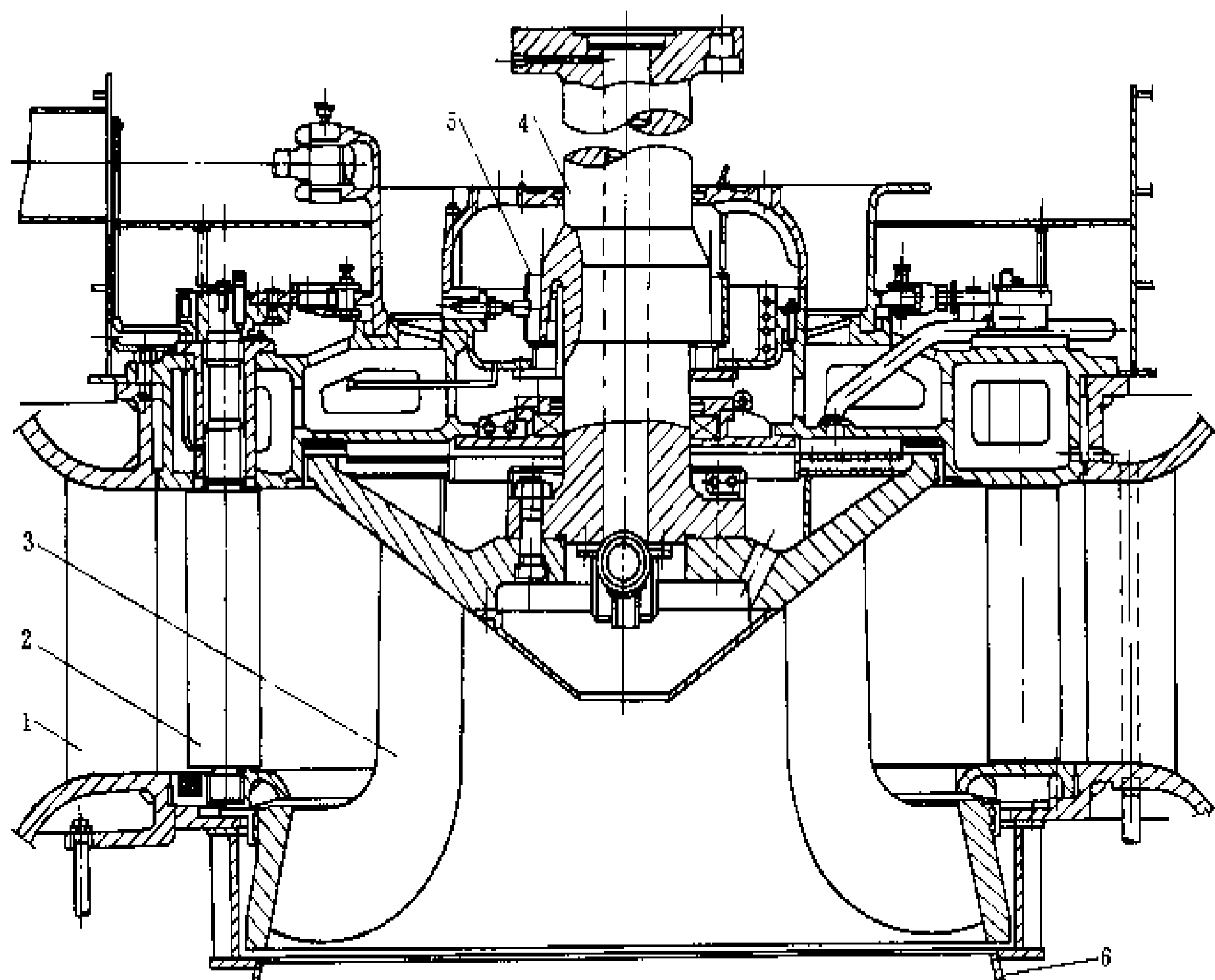


图 1 反击式水轮机结构图

1—座环; 2—活动导水叶; 3 转轮; 4—主轴; 5—导轴承; 6 尾水管

冲击式水轮机的主要部件由导水机构、转轮、主轴、导轴承和机壳等组成,

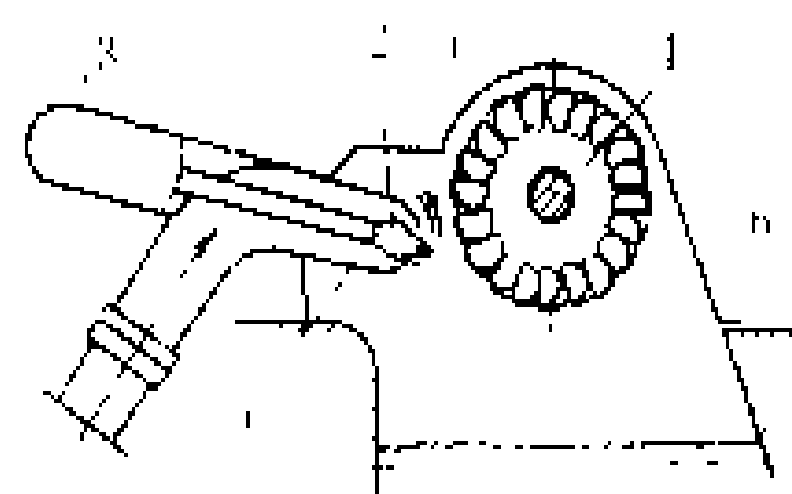


图 2 冲击式水轮机示意图
1—喷嘴; 2—喷针; 3—折向器; 4—转轮; 5—折向器操作机构; 6—机壳

见 图 2。导水机构主要包括喷嘴、喷针和折向器。喷针是调节或关闭喷嘴开口的机构,相当于反击式水轮机的导水叶。折向器位于喷嘴与转轮之间,在机组紧急关闭时用来快速遮断射流,然后再慢速关闭喷针以防止压力钢管压力上升率过高。转轮由水斗和固定水斗的圆盘组成。水斗、喷嘴、喷针是决定冲击式水轮机运行效率和性能的



关键。机壳必须保证转轮出水流畅,使射流处于大气压力下。机壳还用来支撑水轮机轴承。主轴与导轴承的作用与反击式水轮机相同。

机型选择 依据水轮机相似理论,利用水轮机模型试验得出的特性曲线和水电站水头、流量、装机容量等数据,选出水电站适用的水轮机。选择的内容包括水轮机型号、单机容量、水轮机直径、转速、水轮机安装高程等参数和主要通流部件尺寸与结构。水轮机选择通常采用特性曲线法或比转速法两种方法。选择时首先按水电站的工作水头范围和运行特点,确定适用的水轮机类型。利用特性曲线法选择水轮机,主要根据已确定类型中能量和汽蚀特性较优型号的水轮机的特性曲线和相应公式计算出各方案的水轮机参数进行方案比较,最终选出技术先进、经济合理的水轮机。用比转速法选择水轮机,多在没有合适型号水轮机特性曲线可以利用时采用。比转速是根据水轮机的水头、单机出力 and 转速计算出的数值,是表征水轮机性能的重要参数。对比已运行水轮机比转速统计资料,确定出合理的比转速后即可依据有关公式和经验统计曲线计算出水轮机主要参数。小型水轮机可用已有机型的性能图表进行选择,或采用标准产品。随着计算机技术的发展,用于水轮机选择的计算机程序已开始使用。大、中型水轮机适用的水头和比转速范围如表所示。

大、中型水轮机适用的水头和比转速范围

水轮机型式		通用水头范围 (m)	比转速 (m·kW)
冲击式		300~1800	10~35 单嘴
反击式	混流式	30~700	50~350
	斜流式	25~200	100~350
	轴流式	3~80	200~900
	贯流式	<25	600~1000

水电站的水轮机选择,直接关系到水电站的安全经济运行。某个水头的水电站有时可以选择两种型号的水轮机,较高比转速的水轮机往往有较好的能量特性,但汽蚀特性可能较差。因此,在比较方案中要进行不同机型的技术经济比较。对于泥沙较多的水电站,选择水轮机时宜选取较低的参数。水轮机结构部件要满足交通运输的条件。

发展简史 水轮机最初的雏形是水车(水轮),这种水车在公元前已开始应用,将水流引入水车的勺斗中,使水车转动做功。中国在公元前11世纪即已出现水碓,“石碓作水碓,利于踏碓百倍”,晋代已发展到“有人作水轮,轮轴长可数尺”;古代希腊和印度在公元前2世纪已有水轮磨坊的记载。当时的水车主要用于

提水和简单加工的动力。随着手工业的发展,在17~18世纪应用在纺织厂的水轮直径已达到9.15m,功率达450HP。

18世纪到19世纪初,随着现代工业以及科学技术的发展,出现了第一批水轮机,1745年英国人A. 贝克(A. Barker)按反作用力的原理提出了反击式水轮机的设想,1751~1755年瑞士人L. 欧拉(L. Euler)在分析贝克水轮机的工作原理的基础上,提出了反击式水轮机基本理论,1826年法国人B. 富尔内龙(B. Fournegron,曾译富聂隆)第一次命名这种水力原动机为水轮机,并于1827~1834年制造出了第一台功率为6HP的反击式离心式水轮机;1847~1849年美国工程师J. B. 弗朗西斯(J. B. Francis)完成了现代混流式水轮机的设计与制造,称为弗朗西斯水轮机。到19世纪50年代水轮机已具有了现代水轮机的各种部件:导水叶、转轮、蜗壳和尾水管等。19世纪80年代出现了现代水平的冲击式水轮机,是美国人L. A. 佩尔顿(L. A. Pelton)首先提出的,这种水轮机又称为佩尔登水轮机。20世纪开始,由于平原河流开发的需要,1912~1916年捷克的V. 卡普兰(V. Kaplan)教授发展了轴流转桨式水轮机的设计,并创造了肘形尾水管,因此轴流转桨式水轮机又称为卡普兰水轮机。近百年来,水轮机已成为电力工业主要原动机之一,目前世界上单机最大的混流式水轮机额定出力已达716MW,最大的转桨式水轮机额定出力为230MW,最大的水斗式水轮机额定出力为315MW,最大的斜流式水轮机额定出力为215MW。中国于1952年生产第一台800kW混流式水轮发电机组;现在已投入运行的最大的混流式水轮机额定出力为326.5MW;最大的高水头转桨式水轮机额定出力为204MW,葛洲坝水电站两种转桨式水轮机的额定出力分别为175MW和129MW,其水轮机转轮公称直径分别为11.3m和10.2m。

(沙锡林)

shuilunji anzhuang

水轮机安装 (erection of water turbine)

水轮机部件在水电站内组装和调试的施工过程。水轮机部件包括尾水管、转轮室、座环、蜗壳、导水机构、转轮、主轴、导轴承、止水密封装置等。其中尾水管、转轮室、座环和蜗壳安装后均埋入混凝土中,称之为埋设部件。其余为可拆卸部件,其中转轮、主轴又称为转动部件。

大、中型水轮机大多采用立式结构,小型水轮机多为卧式结构。根据水轮机结构型式不同,安装工艺方法也不同。



立式水轮机安装 大、中型水轮机的主要部件,由于尺寸大,重量大,受运输条件限制,制造厂通常将其分为若干瓣加工制造,运至现场再组装成整体,如座环、顶盖等;有的部件运至现场后拼装焊接成整体,如尾水管、蜗壳及大型转轮等。所以安装也是制造的延续。随着单机容量增大,技术要求日益提高,安装前要认真制定好施工措施,保证良好的安装质量。

水轮机安装定位 首先根据水工建筑物测量基准点,定出水轮机的安装中心线和标高点。水轮机中心线以水平面坐标 X、Y 轴表示。Y 轴为机组上、下游水流方向线,上游侧为+Y,下游侧为-Y; X 轴为贯通厂房的横方向线,左侧为+X,右侧为-X。X、Y 轴的交点即为水轮机的中心点,通过中心点的垂直线即为水轮机垂直中心线。

厂房上、下游墙上和左右两侧放置方位基准点和标高点,作为水轮机安装定位的依据。

水轮机的埋设部件按水轮机的中心线和安装高程找正,尾水管、转轮室、座环等几何圆心,严格地与水轮机垂直中心线和标高调整一致。部件上相应的 X、Y 方位与水轮机的 X、Y 轴线调整一致。

水轮机其他部件是以座环或转轮室的镗孔中心为准安装找正,其方法可分为钢琴线找正法和实物找正法两种。钢琴线找正法是在水轮机中心挂一条钢琴线,其下端挂一重锤,浸没于盛有机油的桶中。底环、导水叶、顶盖等均按此钢琴线找正,使其互相保持同心。实物找正法是先将水轮机转轮和主轴吊入机坑,按座环或转轮室找正其中心位置,底环、导水叶、顶盖、固定止漏环等再按转轮找正。

尾水管、转轮室安装 大型水轮机的尾水管,制造厂只供给成形的瓦片,在工地进行拼装焊接。调整好中心和高程,用拉紧螺栓固定后浇筑二期混凝土。轴流式水轮机在尾水管上方设有转轮室,其中心是作为机组安装中心线的基准,因此在安装时要精确调整其中心、高程,同时调整其圆度和同心度,加以固定后浇二期混凝土。

座环、蜗壳安装和焊接 混流式水轮机座环和蜗壳与轴流式水轮机结构不同,安装方式也不同。

(1)混流式水轮机的座环安装在尾水管的上方。座环一般是制成分瓣的结构,在现场用螺栓连接或焊接成整体。座环安装找正后,固定在支墩上。

水轮机金属蜗壳一般由多节组成,每节蜗壳围绕着座环进行安装,先从和+X 轴线重合的定位节开始,向上游方向和下游方向,同时从小头方向进行挂装。每调整好一条环缝即可进行焊接。各节蜗壳全部安装焊完环缝后再焊接蜗壳与座环的连接焊缝。蜗壳焊缝用无损探伤法检验。蜗壳二期混凝土的浇筑应对称均匀

上升。上升速度不宜太快,同时派专人监视座环的水平变形情况,并按监视情况随时调整混凝土的浇筑顺序。

采用高强度钢板制成的蜗壳,为防止产生裂纹和改善焊缝质量,焊前要适当进行预热和焊后热处理。高强度钢的蜗壳有的要求做水压试验。此时在混凝土浇筑和养护期间,蜗壳内部保持一定的水压力,以免机组运行时混凝土承受过大的传力。

(2)轴流式水轮机一般采用支柱式固定导水叶的座环和钢筋混凝土结构的蜗壳。安装时首先要浇筑好钢筋混凝土蜗壳边墙和座环支墩,将支柱式固定导水叶安装在座环支墩的基础板上,然后吊入座环上缘环,安放在支柱式固定导水叶上。此时先连接圆周均匀分布的 4~8 个固定导水叶,用基础板下的楔子调整上缘环安装顶盖的法兰面,使其水平、高程和 X、Y 方位线均符合要求。法兰面的高程应考虑由于蜗壳混凝土顶板的重量对支柱固定导水叶的压缩量,以保证活动导水叶端部间隙值符合要求。

导水机构安装 导水机构由顶盖、底环、活动导水叶及其操作机构组成。一般在主轴和转轮装入之前,底环、顶盖、活动导水叶等先在座环上进行预装,以调整顶盖、底环及止漏环的同心度和导水叶活动的灵活性,并调整研磨导水叶端部间隙和立面间隙,使其关闭时严密、漏水量小。调整好后将顶盖、底环用销钉定位,然后将预装部件全部拆出,待主轴、转轮吊入找正后,按定位销钉进行正式安装。大型混流式或轴流式水轮机的空间较大,安装人员在转轮室内可以进行导水叶立面间隙调整和研磨工作,因此导水机构可不进行预装,待转轮吊入后用实物找正法进行调整定位安装。高水头或小型机组的导水机构在制造厂进行预装。

转轮的组装和焊接 混流式水轮机整体制造加工的转轮在现场可以直接和主轴连接吊入机坑安装就位。直径较大的转轮一般分为两瓣制造,在现场组装,上冠用螺栓连接,下环焊接成整体。其焊缝要进行局部热处理,以消除内应力。上下止漏环外圆用转动架车削或磨圆修整。

在现场组装焊接的转轮,最后都要做静平衡试验。

轴流转桨式的转轮、轮毂、叶片和操作机构,分件运至现场进行组装。经油压操作试验和对密封做严密性试验,合格后,整体吊入安装。

导轴承安装 水轮机导轴承有橡胶轴承和合金轴承两种。橡胶轴承一般均为筒式的,用水润滑,安装前检查其与水轮机主轴的配合间隙,如间隙不符合要求,可在瓦的背面用垫片调整。合金轴承的瓦面一般用巴氏合金制成,用油润滑,按其构造又可分为筒式瓦和分块瓦两种,安装前要按水轮机主轴的轴颈进行研刮,要

求瓦面均匀接触。水轮机巴氏合金导轴承瓦也有不经研刮直接进行安装的,但制造厂在加工尺寸和表面光洁度方面须按不研刮轴承瓦的要求加工。

卧式水轮机安装 卧式水轮机包括卧式小型混流式水轮机、卧式冲击式水轮机和贯流式水轮机。

小型混流式水轮机安装 小型混流式水轮机多为卧式,水轮机轴横向水平放置,导轴承和推力轴承组合为一体。安装时,在混凝土基础上先安装蜗壳体,按厂房 X、Y 轴线找正位置,调整好蜗壳体上转轮室连接尾水管的法兰面的垂直度,浇二期混凝土固定。

水轮机轴和发电机轴连结在一起。导轴承按轴找正,调整轴瓦和轴颈面及推力镜板面的接触情况,合格后固定。乌金轴瓦底部和轴颈接触,只研刮 60°接触角宽面,其余部分逐渐刮大间隙,以积存多量的润滑油。油冷却器放置在尾水管下层的流水中,润滑油经油泵循环流动,以降低轴瓦温度。

卧式冲击式水轮机 中、小型冲击式水轮机也多为横轴卧式机组,其安装方法大体与混流式卧式机组相仿。在安装转轮时注意喷嘴中心线和转轮节圆相切,用特制中心样板找正,对准水斗分刃,以防运转时,转轮受水流冲击,产生轴向串动。

贯流式水轮机安装 贯流式水轮机为横轴卧式,安装在坝体厂房内。贯流式水轮机安装包括:①尾水管、座环等埋件安装;②主轴、导轴承、推力轴承、内配水套装配和安装;③导水叶和外配水套装配和安装;④调速环、导水机构安装;⑤转轮、上下转轮室安装。

(1) 贯流式机组安装的特点。尾水管、座环(亦称管形座)是随厂房混凝土同时安装浇筑,其中心位置要和厂房 X、Y 轴线坐标一致,管口的垂直度和平行度以及管口之间的距离要准确,不允许有超过规定的偏差;外壳的组合面(或焊接缝)和管口的连接面应密封严密,不允许漏水。

(2) 埋件部分安装。首先安装尾水管,调整管口法兰面的中心和垂直度并与厂房 X-X 轴线平行,找正后牢固地固定在基础上,浇混凝土时随时监视变形情况,保证安装质量。其次安装座环,即以尾水管口为基准找正座环中心。座环的法兰面要和尾水管法兰面平行,两管口的距离用间距支撑管调整,使其偏差不超过规定范围。支撑和拉紧后浇二期混凝土。

(3) 主轴和导轴承在安装间组装。推力轴承和发电机侧导轴承组合装配在一起,按规定研刮轴承瓦,配好推力轴瓦垫片。在主轴上装好内配水套。用厂内桥式起重机将主轴和这些配件同时吊入机坑,通过尾水管口和座环法兰的空间,斜向伸入座环内,装在轴承支座上。调整轴承座和主轴中心,并将轴承座抬高一定数

值,以便被转轮和发电机转子重量压沉,修正轴心正确位置。

(4) 导水叶和外配水套在安装间平台上装配,并转动导水叶检查端面间隙,按设计要求进行调整。导水叶轴转动灵活。然后装上导水机构和调速环。用厂内桥式起重机同时将装配好的这些部件整体立起吊入机坑安装。

(5) 转轮和转轮室安装。先装下半转轮室,按轴流转桨式转轮组装方法将组装好的转轮,吊入转轮室和主轴连接。然后再装上半转轮室。检查转轮室和叶片间隙,应符合设计要求。

连接好导水机构和转轮叶片的接力器,通入压力油,用调速器操作进行开、关试验。

水轮机的调试 水轮机各部件全部安装完,向导水机构和转轮叶片的接力器通入压力油,与调速系统一起做开关导水叶及转轮叶片等联动试验。检查调速器操作导水机构开关导水叶情况及转轮叶片开关情况,测量并记录导水叶开度与接力器行程的关系曲线。最后调整水轮机导水叶的压紧行程。

(刘玉林)

shuilunji anzhuang gaocheng

水轮机安装高程 (installation elevation of water turbine) 为防止水轮机汽蚀而确定的水轮机基准线的设置高程。该基准线,对于立轴反击式水轮机是导水叶中心线高程;对于立轴冲击式水轮机是水斗中心线高程;对于横轴反击式及冲击式水轮机是主轴中心线高程。根据蜗壳和尾水管的尺寸,水轮机安装高程基本决定了主机间的基础开挖高程。

立轴反击式水轮机安装高程 Z_s 表达式(见图):

$$\text{混流式} \quad Z_s = Z_a + H_s + \frac{b_0}{2}$$

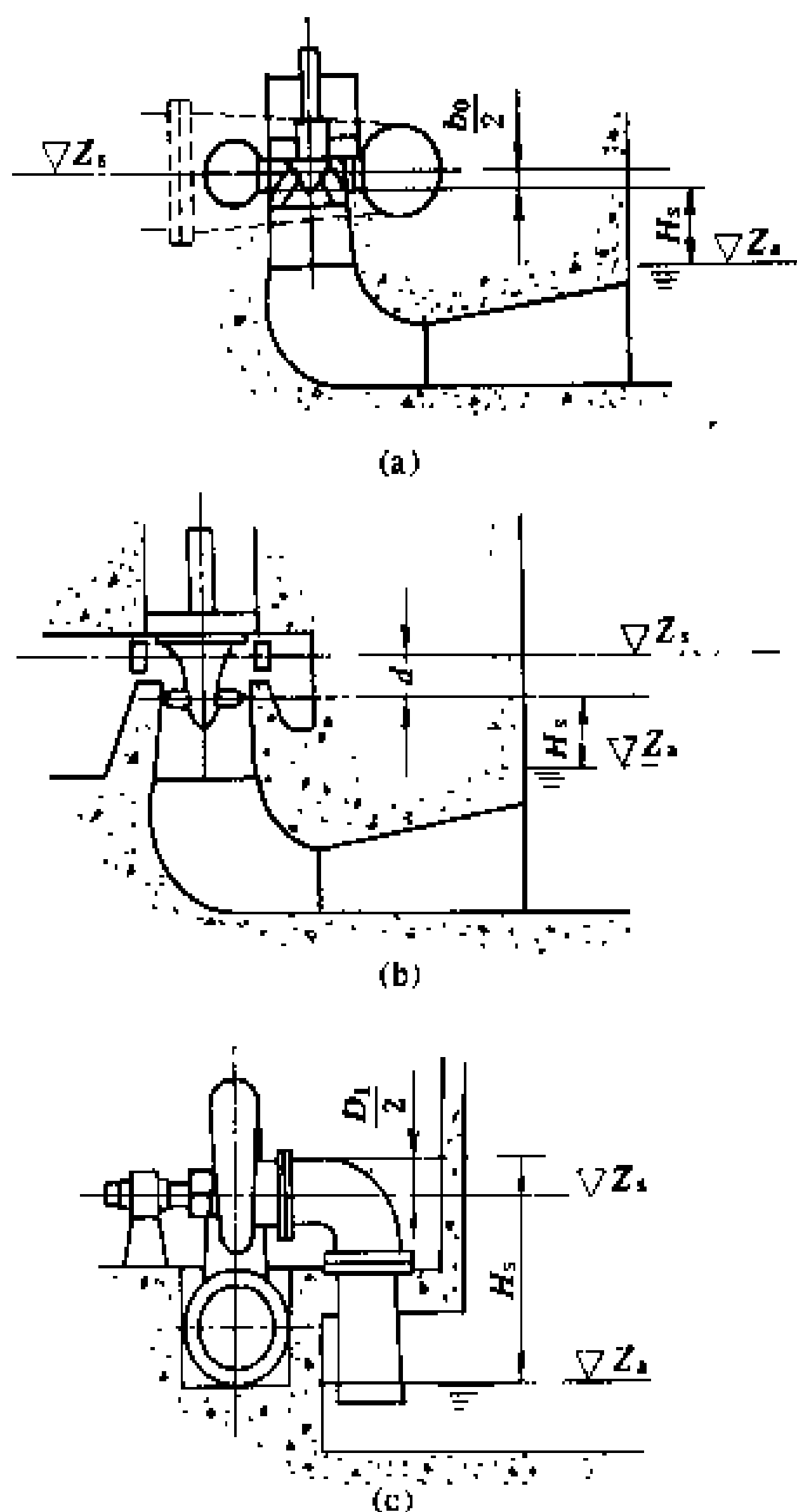
$$\text{轴流式} \quad Z_s = Z_a + H_s + d$$

横轴反击式水轮机安装高程 Z_s 表达式:

$$Z_s = Z_a + H_s - \frac{D_1}{2}$$

式中 b_0 为导水叶高度; d 为叶片转动中心线至导水叶中心线高差; D_1 为转轮直径; Z_s 为设计尾水位: ①多机组水电站通常采用 1 台机组发出额定出力时相应流量时的尾水位。②无调节的径流水电站可采用相当设计保证率的枯水流量的尾水位。 H_s 为水轮机吸出高度,高出设计尾水位的取正值,低于设计尾水位的取负值: ①立轴混流式水轮机为设计尾水位至导水叶机构下环平面的高差。②立轴轴流式水轮机为设计尾水位至叶片转动中心的高差。③横轴反击式水轮机为设计尾水位至转轮叶片最高点的高差。

冲击式水轮机安装高程，应使得水斗最低点高于尾水槽(坑)内设计最高尾水位，并留一定的安全余度，保证转轮都处于大气下运行。



水轮机安装高程示意图

(a) 混流式；(b) 轴流式；(c) 横轴反击式

(李必如)

shuilunjiceng

水轮机层 (turbine floor) 水轮机蜗壳顶板至发电机层楼板之间的楼层。立轴机组的水轮机层中部为机组及机墩，其周围布置有操作导水叶的接力器、发电机引出母线、中性点、油水气管道及电缆等。当发电机支承结构为矮机墩时，则发电机定子、转子、下机架都落在水轮机层内。水轮机层地面一般多采用水泥抹面，也有的采用水磨石。地面上常设有电缆沟、管道沟，一般加有盖板以方便交通。

水轮机层的高度与发电机尺寸和布置有关，一般要满足发电机引出母线及设备布置需要，还要考虑人行交通和设备搬运，大型机组从水轮机层地面至发电机层之间高度较大，有的增加中间夹层。

横轴机组的水轮机和发电机装置在同一层，其下面为水轮机的泄水结构。灯泡贯流式机组，其发电机和水轮机都装置在下部过水管道内。

(李必如)

shuilunji chuli

水轮机出力 (output of water turbine)

水轮机轴输出的机械功率，以 P 表示，单位为 kW 或 MW。可由下式计算

$$P=9.81QH\eta$$

式中 Q 为水轮机流量， m^3/s ； H 为水轮机工作水头， m ； η 为水轮机效率， $\%$ 。

在水轮机设计和运行中常采用额定出力、最优效率出力和最大出力、最小出力等水轮机出力值。

(1) 水轮机额定出力 P_n 。为水轮机的铭牌出力，是在额定水头、额定流量、额定转速下发电机发出额定出力时水轮机的出力。

(2) 水轮机最优效率出力 $P_{\eta\max}$ 。为水轮机在最优效率运行时发出的出力。

(3) 水轮机最大出力 P_{\max} 。为水轮机带动发电机发出其最大出力时水轮机的出力，一般为额定出力的 $105\%\sim 115\%$ 。

(4) 水轮机最小出力 P_{\min} 。为水轮机在最小水头下，导水叶全开时发出的最大轴出力。

(青长庚)

shuilunji danwei canshu

水轮机单位参数 (unit parameter of water turbine)

几何相似的水轮机在动力相似和运动相似条件下取水头为 1 m 、转轮直径为 1 m 换算得出的参数，包括水轮机单位转速 n_1' 、水轮机单位流量 Q_1' 和水轮机单位出力 P_1' 。单位参数是相似水轮机共同具有的特性值，用以对不同尺寸相似水轮机间的参数换算。在工程实用上，都是假定模型和原型相似水轮机间的容积效率、水力效率、机械效率、流速系数等彼此相等，据以导出近似公式，在工程计算中再根据经验进行修正。

水轮机单位转速 是指转轮直径为 1 m 的水轮机在 1 m 水头下所具有的转速，由圆周速度相似关系导出，用 n_1' 表示。原型和模型水轮机的圆周速度表示为

$$u_1=K_{u1}\sqrt{2gH}=\pi D_1n/60\quad(1)$$

$$u_{1m}=K_{u1m}\sqrt{2gH_m}=\pi D_{1m}n_m/60\quad(2)$$

将 $H_m=1\text{ m}$ ， $D_{1m}=1\text{ m}$ ，以 n_1' 代表 n_m 代入上式联解得

$$n_1'=\frac{nD_1}{\sqrt{H}}\quad(3)$$

式中 u_1 为圆周速度， m/s ； K_{u1} 、 K_{u1m} 为流速系数； g 为重力加速度， m/s^2 ； H 为水轮机工作水头， m ； D_1 为转轮公称直径， m ； n 为转速， r/min ；下脚标 m 代表模型转轮各相应值。

不同型式水轮机在不同水头条件下具有其特有的

最优单位转速 n_{10}' 见表 1, 它随水轮机使用水头增高而

表 1 不同水头下的最优单位转速

	轴流式水轮机	混流式水轮机	冲击式水轮机
工作水头 $H(\text{m})$	3~55	30~320	100~600
最优单位转速 $n_{10}'(\text{r/min})$	142~107	88.3~61.5	40~39

降低。随着水轮机设计水平的提高, 最优单位转速有提高的趋势, 这对提高机组转速, 降低设备造价有利。轴流式水轮机可通过减小叶栅稠密度、减小翼形挠度和扭角, 混流式水轮机可通过减小进口边的平均直径或减小叶片的进口角等来提高转速。但单位转速提高反映圆周速度增大, 在水流速度三角形中表现为水流入口角减小, 相对速度增大, 使汽蚀性能恶化、能量指标下降, 因而单位转速提高的幅度是很有限的。(见水轮机汽蚀和磨损)

水轮机单位流量 是指转轮直径为 1 m 的水轮机在 1 m 水头下的过流量, 由水轮机流量相似关系导出, 用 Q_1' 表示。原型和模型水轮机的流量表示为

$$Q = Z_0 K_v a_0 b_0 \sqrt{2gH} \tag{4}$$

$$Q_m = Z_0 K_v a_{0m} b_{0m} \sqrt{2gH_m} \tag{5}$$

根据相似关系

$$\frac{a_0 b_0}{a_{0m} b_{0m}} = \left(\frac{D_1}{D_{1m}} \right)^2 = \lambda^2 \tag{6}$$

将 $H_m=1\text{m}$ 、 $D_{1m}=1\text{m}$ 代入式 (4)、(5)、(6), 以 Q_1' 代表 Q_m 联解得

$$Q_1' = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}}$$

对于冲击式水轮机

$$Q_1' = 3.482Z\varphi\left(\frac{d_0}{D_1}\right)^2 \tag{7}$$

当喷嘴数 Z 为 1, 喷嘴流速系数 $\varphi=0.97$

$$Q_1' = 3.38\left(\frac{d_0}{D_1}\right)^2 \tag{8}$$

式 (4)~式 (8) 中 Z_0 为导水叶数; K_v 为流速系数; a_0 为导水叶开度, m; b_0 为导水叶高度, m; d_0 为射流直径, m。

不同型式水轮机在不同水头下的过流量有一定限

表 2 不同水头下推荐使用最大设计单位流量

	轴流式水轮机	混流式水轮机	冲击式水轮机
工作水头 $H(\text{m})$	3~55	30~320	100~600
推荐使用最大设计单位流量 $Q_1'(\text{L/s})$	2000~1300	1400~280	45~30

度, 推荐使用的最大设计单位流量 Q_1' 见表 2, 它随水轮机工作水头增高而降低。随着水轮机设计水平和测

试精度的提高, 单位流量数值有提高的趋势, 反映水轮机出力增大或直径减小。轴流式水轮机可通过减小轮毂比、缩小叶栅稠密度、增大叶片扭角和出口扭角; 混流式水轮机可通过加大导水叶高度、减少转轮叶片数、扩大下环扩散角、减小叶片包角和切割出水边等来提高单位流量。任何一项提高单位流量措施都会不同程度地影响水轮机的性能, 一般都是结合电站实际, 在保证具有较高效率和汽蚀性能前提下, 优化提高单位流量。

水轮机单位出力 是指转轮直径为 1 m 的水轮机在 1 m 水头下的出力, 由水轮机出力相似关系导出, 用 P_1' 表示。原型和模型水轮机的出力表示为

$$P = \gamma Q H \eta \tag{9}$$

$$P_m = \gamma Q_m H_m \eta_m \tag{10}$$

假定 $\eta=\eta_m$, 取 $H_m=1\text{m}$, $Q/Q_m=D_1^2 \sqrt{H}$, 以 P_1' 代表 P_m 联解得

$$P_1' = \frac{P}{D_1^2 H^{3/2}} \tag{11}$$

对冲击式水轮机

$$P_1' = 28.4Z\left(\frac{d_0}{D_1}\right)^2 \tag{12}$$

式中 P_1' 为水轮机的单位出力, kW; Z 为一台水轮机的喷嘴数。

(青长庚)

shuilunji daozhoucheng

水轮机导轴承 (guide bearing of water turbine) 承受水轮机转动部分的径向力, 保持转轮和主轴绕旋转中心转动的部件。水轮机导轴承主要分为水润滑橡胶导轴承和稀油润滑导轴承两大类。

容量较小的卧式机组也有采用滚动轴承的。

水润滑橡胶导轴承 水润滑橡胶导轴承的轴承体上镶有 6~12 块粘有橡胶或桦木的钢衬轴瓦, 见图 1。整个轴承用螺钉固定在顶盖上。橡胶轴瓦内表面开有许多纵向槽, 使水进入轴瓦和轴颈之间起润滑和冷却作用。用轴瓦背面的支顶螺栓调整轴瓦和轴颈的间隙。轴颈包焊不锈钢轴衬防止主轴锈蚀。润滑水水压为

0.15~0.2 MPa。这种轴承结构简单, 安装方便, 重量轻, 不怕水淹, 工作可靠, 密封在轴承上部便于维护检修。如果水中含有泥沙容易磨损轴颈和轴瓦, 瓦隙易变, 刚性和稳定性不

如油轴承。润滑水的含沙量及其悬浮物质不应超过 0.1 g/L。橡胶瓦钢衬用钢板制造, 滑动面用中硬度耐



磨橡胶，并且有耐酸碱性能，瓦面光洁度为▽7。

稀油润滑导轴承 稀油润滑导轴承用透平油润滑，滑动面浇注锡基轴承巴氏合金，瓦面光洁度▽8。分筒式导轴承和分块瓦导轴承两种。

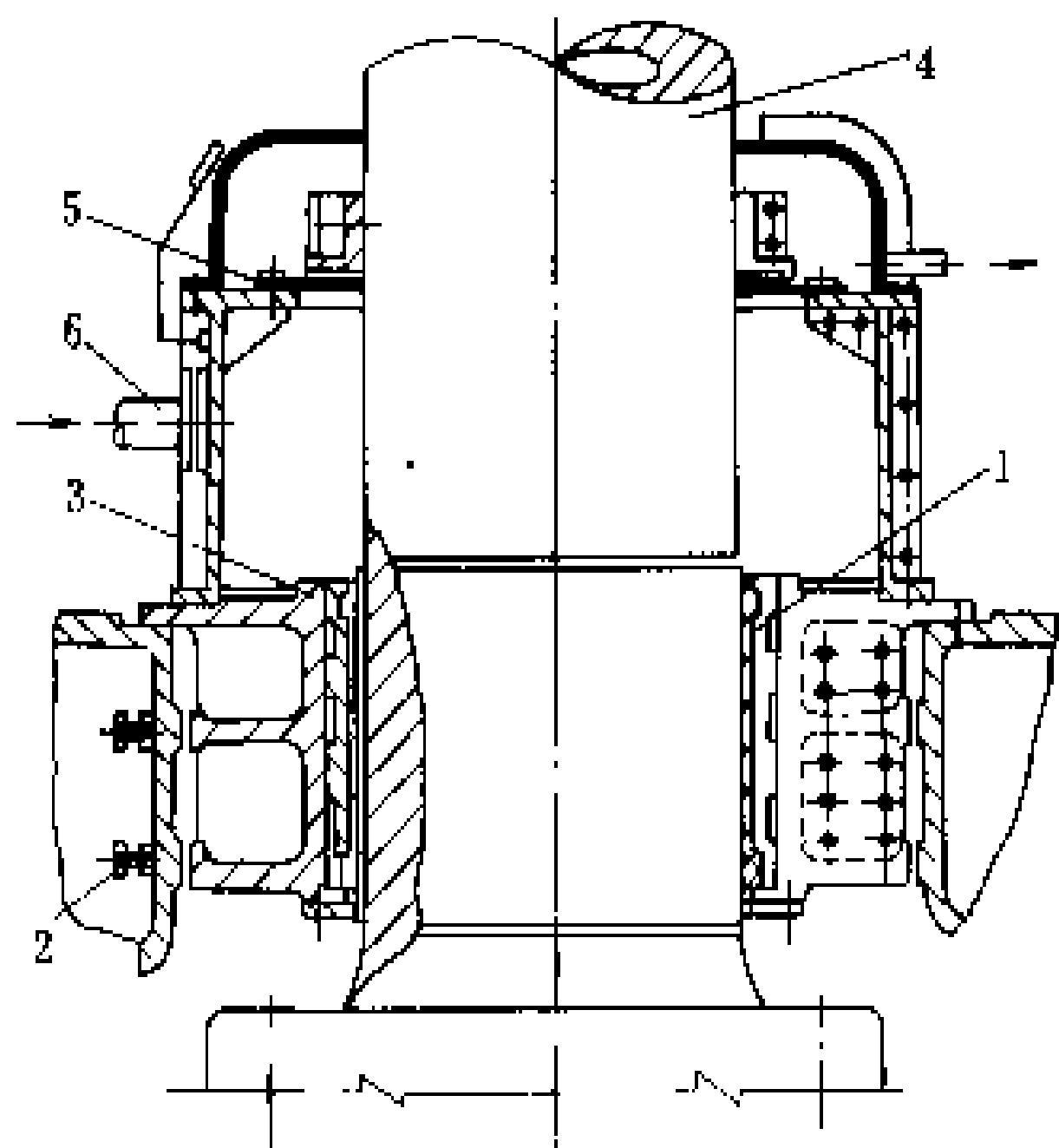


图1 水润滑橡胶导轴承

1—橡胶轴瓦；2—支顶螺栓；3—不锈钢轴衬；4—主轴；5—橡胶平板密封；6—进水管

(1) 筒式导轴承。见图2。轴承体由2~4瓣组成，下部有一旋转油盆，利用油盆旋转产生的油压进行润滑。筒式导轴承的油冷却方式有两种，一种有冷却器，设在上部油箱；另一种冷却水通入瓦背，直接在瓦背冷却。这种轴承结构简单，平面布置紧凑，运行可靠，刚性好，但主轴密封在旋转油盆下面，检修维护不便。

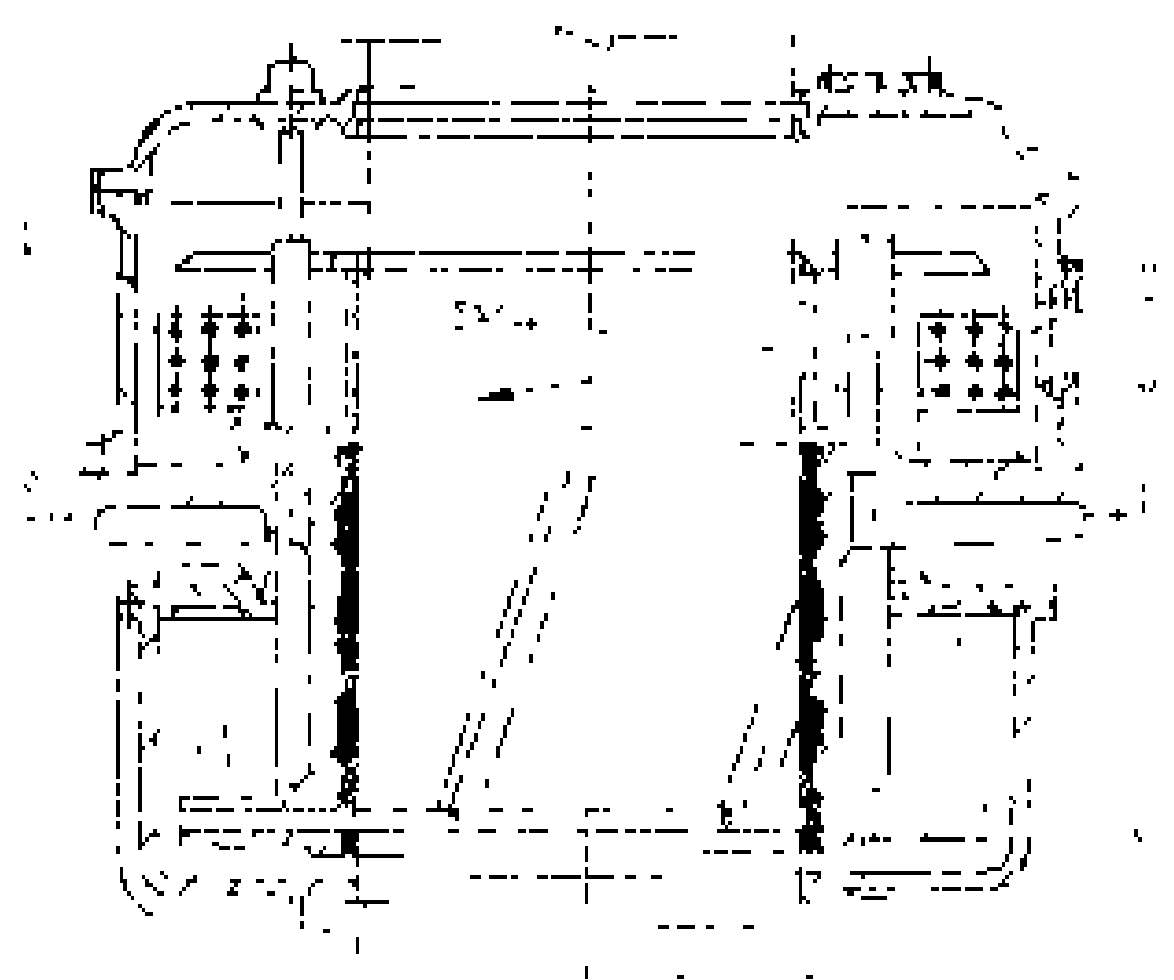


图2 稀油润滑筒式导轴承

1—旋转油盆；2—冷却器；3—轴承体；4—上部油箱

(2) 分块瓦导轴承。见图3。由8~12块轴瓦组成。其轴领、轴瓦、轴承体都浸在油内。轴领可和主轴锻成一体，也可将轴领焊在轴上，当主轴不带法兰时轴领可热套在轴上。分块瓦轴承外形尺寸较大，适用于轴颈超过1m的轴承。这种轴承运行中受力均匀，有自调能力，安装方便，但刚性稍差，轴承下部装有主轴密封，检修维护不便。

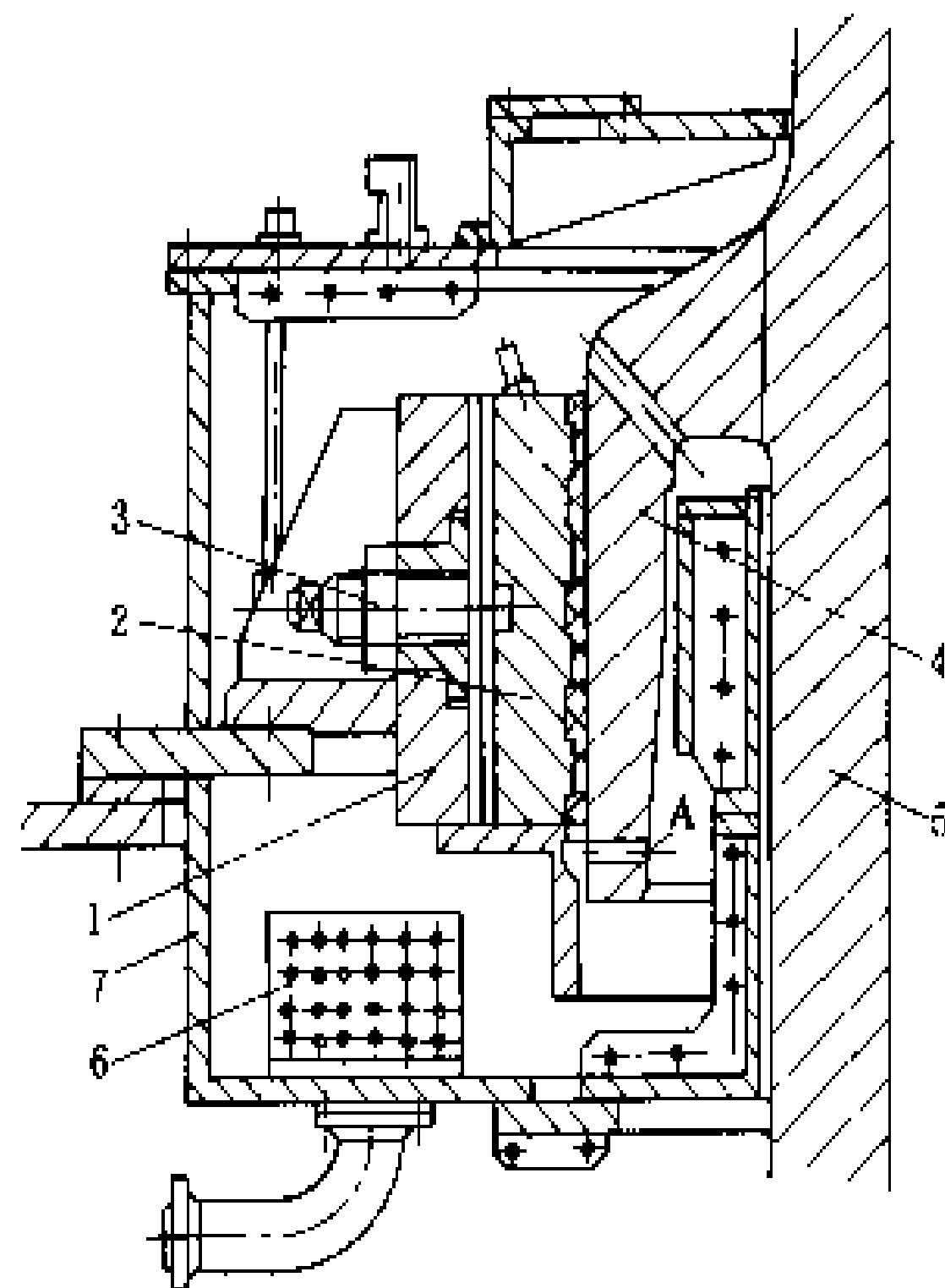


图3 稀油润滑分块瓦导轴承

1—轴承体；2—轴瓦；3—支顶螺栓；4—轴领；5—主轴；6—冷却器；7—油箱

(吴次光)

shuilunji eding zhuansu

水轮机额定转速 (nominal speed of water turbine)

同轴水轮发电机的同步转速(见水轮发电机转速)，以 n_n 表示，单位为r/min。

同步转速计算式为

$$n = \frac{60f}{p} \quad (1)$$

式中 p 为发电机磁极对数； f 为电力系统频率。

对频率为50Hz的电力系统中，同步转速为

$$n = \frac{3000}{p} \quad (2)$$

水轮发电机组的额定转速首先是利用模型水轮机的最优单位转速 n_{10}' 计算求得最优转速 n 。然后对应选取与最优转速相邻近的同步转速作为额定转速，即

$$n = \frac{n_{10}' \sqrt{H_{av}}}{D_1} \quad (3)$$

式中 H_{av} 为加权平均水头，m； D_1 为水轮机转轮的公称直径，m。

(青长庚)

shuilunji feiyi zhuansu

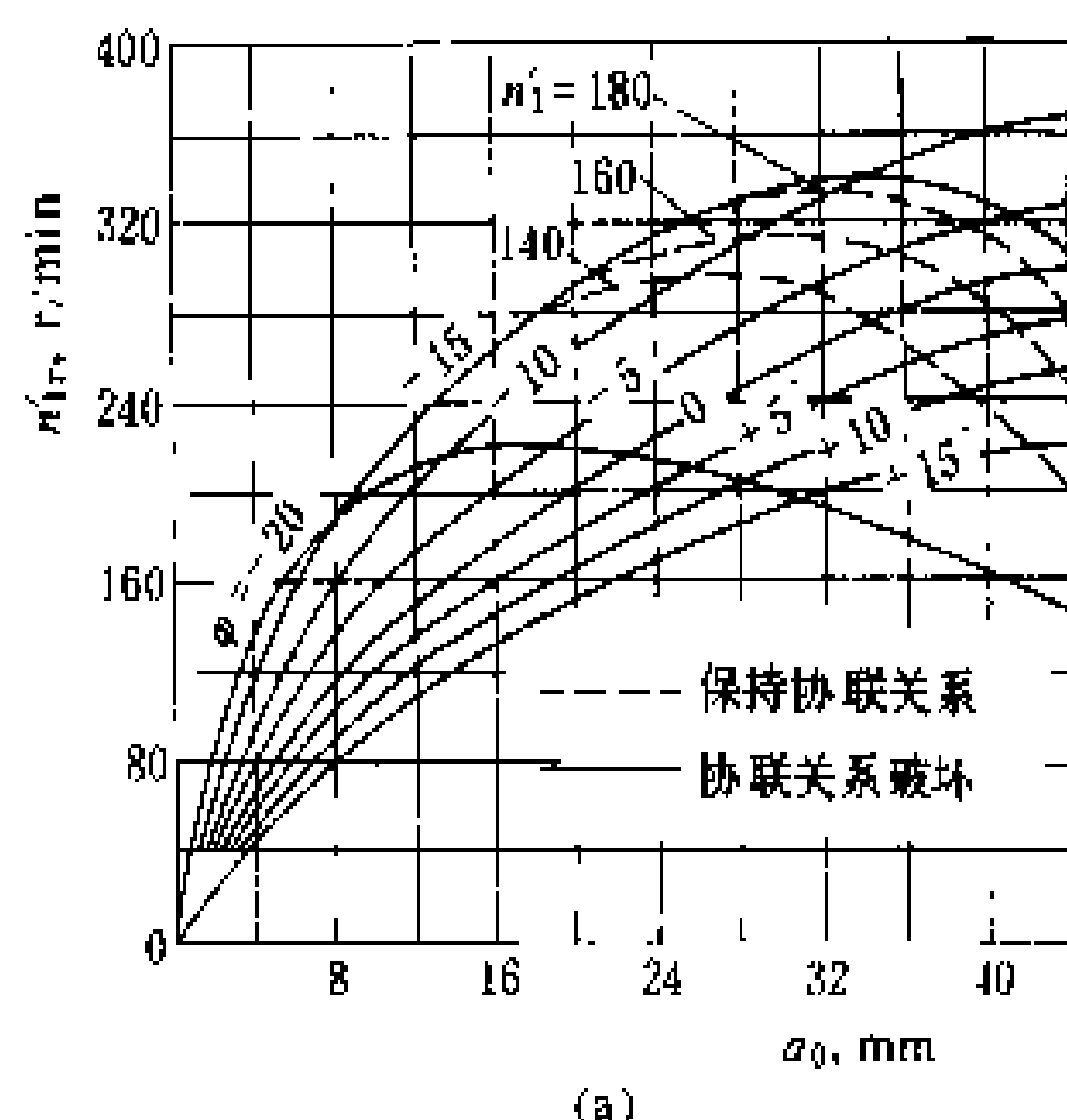
水轮机飞逸转速 (runaway speed of water turbine)

机组不带负荷，水轮机在不同水头和不同导水叶开度下可能达到的稳定转速。以 n_r 表示，单位为r/min。

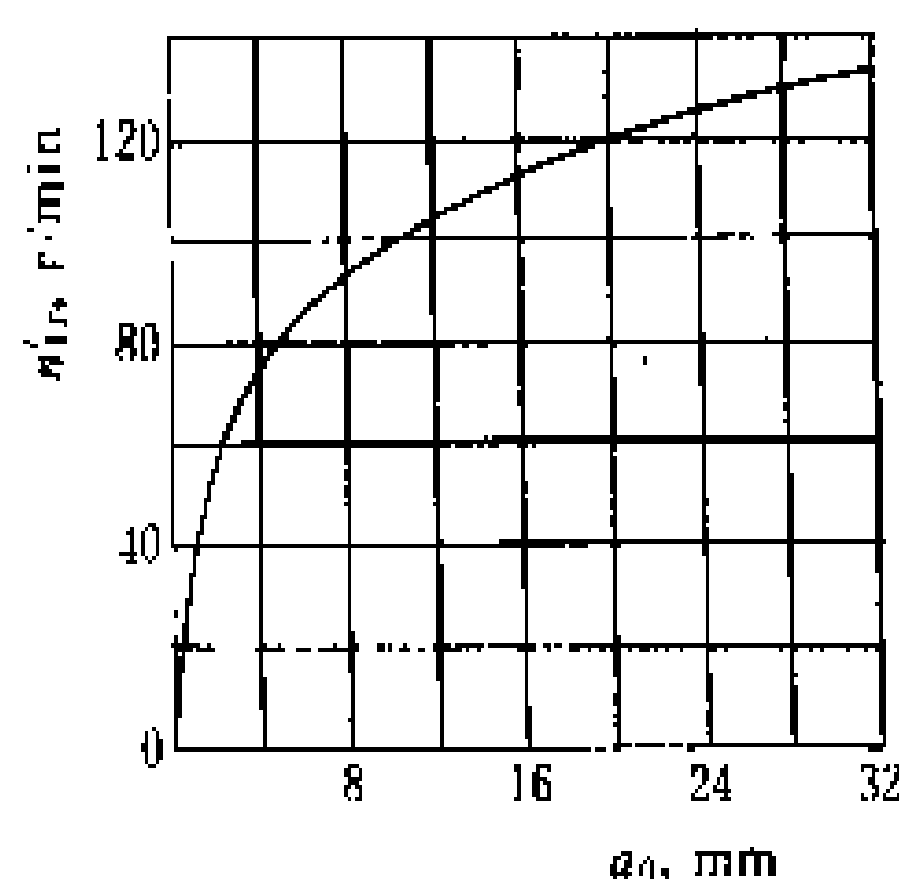
水轮机的飞逸转速，根据模型试验所得的单位飞逸转速 n'_{1r} （见图）按下式换算

$$n_r = \frac{n'_{1r} \sqrt{H}}{D_1}$$

式中 H 为水头，m； D_1 为水轮机转轮公称直径，m。



(a)



(b)

水轮机飞逸特性曲线图

(a) 轴流式水轮机；(b) 混流式水轮机

冲击式水轮机的单位飞逸转速 n'_{1r} 为最优单位转速的 1.8~2.0 倍，最优单位转速 n'_{10} 一般为 39~40 r/min，其变化范围很小。

飞逸转速与水轮机的工作水头和导水叶开度（冲击式为针阀开度 s_0 ）有关，在最大水头和最大开度时飞逸转速最大。轴流转桨式水轮机还和桨叶转角 φ 和导水叶开度 a_0 有关，最大飞逸转速出现在协联关系破坏时。最大飞逸转速是发电机结构强度计算的重要依据。

（青长庚）

shuilunji jingpingheng

水轮机静平衡 (static balancing of water turbine)

消除水轮机的转轮重心与其几何中心不一致的方法。进行静平衡的目的，在于消除由于水轮机转轮在制作时铸造或加工不够精确，使转轮重心和几何中心不一致时，

引起水轮机运行中出现的主轴摆度大、轴承偏磨或机组振动大等现象，以保证水轮发电机组的安全稳定运行。所采取的措施是进行人工平衡，也就是校正平衡。平衡工作包括确定平衡块重量、装设（或者是挖除）平衡重量的位置。

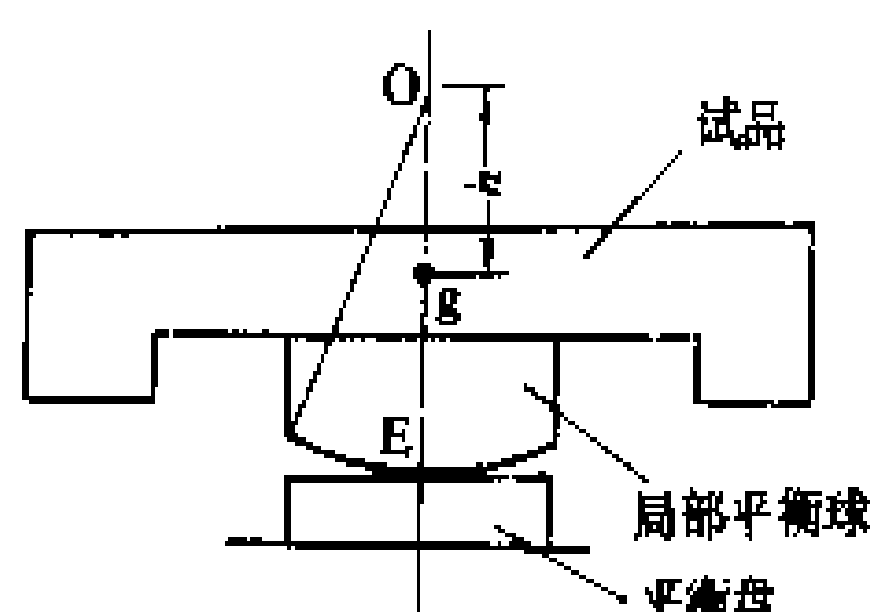


图 1 物体的稳定静平衡示意图

物体的稳定静平衡如图 1 所示，当被试平衡物体

的重心“g”位于平衡球心“O”的下方，并在局部平衡球的对称中心线 OE 上，被试物体可以得到平衡而不出现倾斜，也即可以不作平衡调整。而当“g”偏离了中心线 OE 时，则需要作平衡调整。

转轮静平衡检测 图 2 所示为混流式水轮机转轮的立式静平衡试验装置，由平衡支柱 6、平衡盘 5、调整螺杆及平衡球 1、平衡支座 4、压板 3 和千斤顶 8

等组成。在平衡支座 4 的上部中孔内镶嵌有一个特制的大螺母，与平衡球上部的螺杆 1 的螺纹相配合，使其将平衡系统的重量传递给平衡支柱。轴流式水轮机转轮的立式静平衡试验装置结构与混流式水轮机转轮试验装置结构类同。

整体制造的水轮机转轮的静平衡在制造厂进行。大型水轮机组由于运输条件的限制，需要将转轮分成若干瓣制作，运到施工现场后再

组合焊接成整体，此时对转轮的静平衡工作需在现场进行。

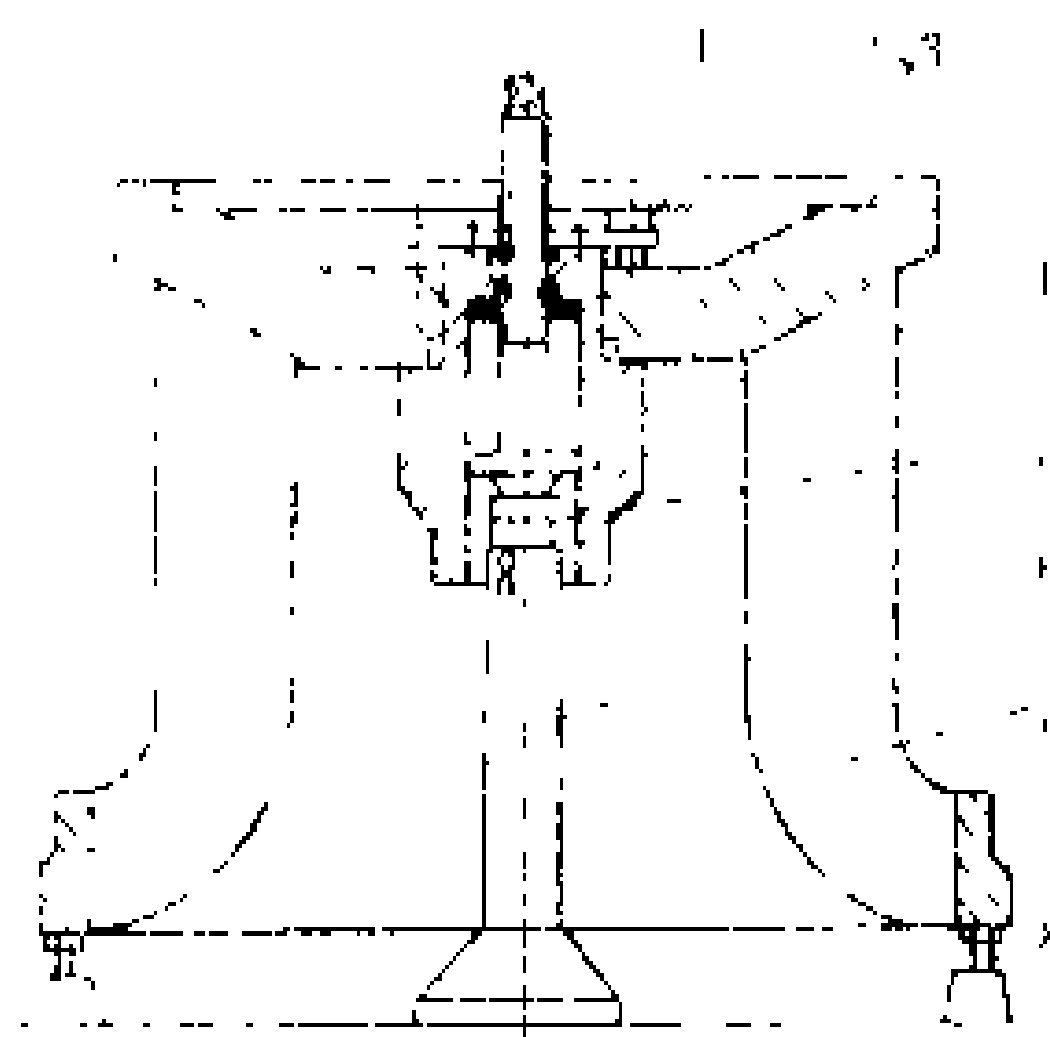


图 2 混流式水轮机转轮静平衡试验装置

1—调整螺杆及平衡球；2—顶丝；3—压板；4—平衡支座；5—平衡盘；6—平衡支柱；7—转轮；8—千斤顶

过去对一些小的机组是在装设静平衡试验装置后，通过试加重块检查出不平衡位置及需要加配的重量进行加重处理。目前随着机组容量的加大，设备尺寸与重量均相应增加，对于静平衡的检测，改用 4 台短行程液压千斤顶，其顶部与转轮平面接触的头为球面，使其尽量减小接触点。对于千斤顶的布置要求在水轮机转轮下边准确地按照互为 90° 的位置布置，并应使相对应的两套千斤顶连接线准确地通过转轮的中心线，在转轮的上边平面上放置两台精确的水平仪，测量精度应在 0.04 mm/m 以内，摆放的位置应互为 90° 并且应与千斤顶相对应。当准备工作完毕后，可以将径向相



对应的两台液压千斤顶通入油压顶起转轮,当转轮抬起后可从水平仪测出与两台千斤顶连接线呈 90°的位置重心偏差值,采取逐步试加重块确定转轮平面达到水平所需要的平衡重量及其径向位置。然后撤去油压,放下转轮并取下试加的重块。再对另外的两台相对应的千斤顶通入油压,顶起转轮,按照上述同样方法,测量出所需加的平衡重量及其径向位置,最后通过计算求出平衡重量与其配置位置,决定出消除不平衡的措施。

消除转轮不平衡措施 一般有两种方法,一种是挖除母材的方法,另一种是加焊配重块法。前者可以在重心偏大的一侧挖除母材,后者则在其相对应的另一侧加焊配重块,通过校正以达到平衡,使其重心与旋转中心基本一致。至于采用哪一种方法,应视加工条件来决定,在制造厂由于机具设备完善可采用挖除母材的方法,而在现场则因加工条件困难可采取配焊重块的方法。

(杨承沪)

shuilunji liu liang

水轮机流量 (discharge of water turbine)

单位时间内通过水轮机的水量,以 Q 表示,单位为 m^3/s 。水轮机出力与流进水轮机的流量成正比,用下式计算

$$Q = \frac{P}{9.81H\eta}$$

式中 P 为水轮机出力, kW; H 为水头, m; η 为水轮机效率, %。

水轮机特征流量有三种: ①水轮机空载流量 Q_0 。为水轮机不带任何负荷而维持在额定转速下运行时的流量。②水轮机额定流量 Q_n 。为在额定水头、额定转速下, 机组发出额定出力时水轮机的流量。③水轮机最大流量 Q_{\max} 。为在发电机发出其最大出力的最低水头 H_{\min} (见水轮机特征水头) 下发电机发出最大出力时水轮机的流量。

(青长庚)

shuilunji maxing shiyan

水轮机模型试验 (model test of water turbine)

根据水轮机相似理论, 用模型水轮机在专门的试验台上进行的用以确定原型水轮机的各种参数和性能的试验工作。其目的是使理论计算与模型试验相互验证、反复修改以得到理想的水轮机。

水轮机模型包括从进水管、蜗壳、导水机构(或针阀)、转轮到尾水管标准段末端的全部模型段, 转轮是能量转换部件, 对各项特性的影响最大, 是试验的重点。

模型试验项目 主要有能量、汽蚀、飞逸和尾水管压力脉动等。

(1) 能量试验。测定水轮机输入、输出功率之比值即水轮机效率, 用 η 表示为

$$\eta = \frac{P}{P'} = \frac{M\omega}{\gamma QH} = \frac{\pi}{30} \times \frac{Mn}{\gamma QH} \quad (1)$$

式中 P 为输出机械功率, kW; P' 为输入水能功率, kW; M 为水轮机轴产生的扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; ω 为角速度, rad/s ; γ 为水的重度, 9810 N/m^3 ; n 为水轮机的转速, r/min ; Q 为流过水轮机的流量, m^3/s ; H 为试验水头, m。

(2) 汽蚀试验。测定代表汽蚀性能的汽蚀系数, 以 σ 表示

$$\sigma = \frac{p_a - p_{va} - H_s - p_v}{H} \quad (2)$$

式中 p_a 为大气压力; p_{va} 为尾水箱内的真空; H_s 为水轮机吸出高度; p_v 为试验水温下的汽化压力。

(3) 飞逸试验。测定水轮机能量使转轮力矩为零时所能达到的最高转速, 即水轮机飞逸转速, 用 n_r 表示。工程上都换算为转轮直径为 1 m 和水头为 1 m 下的单位飞逸转速, 用 n_{1r}' 表示

$$n_{1r}' = \frac{n_r D_1}{\sqrt{H}} \quad (3)$$

式中 n_{1r}' 为单位飞逸转速, r/min 。

(4) 尾水管压力脉动试验。为测定水轮机运行时转轮叶片末端因卡门涡列 (Karman vortex street) 引起的水流扰动力、汽蚀脱流引起的弹性水流以及转轮后尾水管内的空腔涡带等使尾水管内水流产生周期性的压力脉动 Δp 与相应工作水头比值的百分比, 以 A 表示

$$\bar{A} = \frac{\Delta p}{H} \times 100\% \quad (4)$$

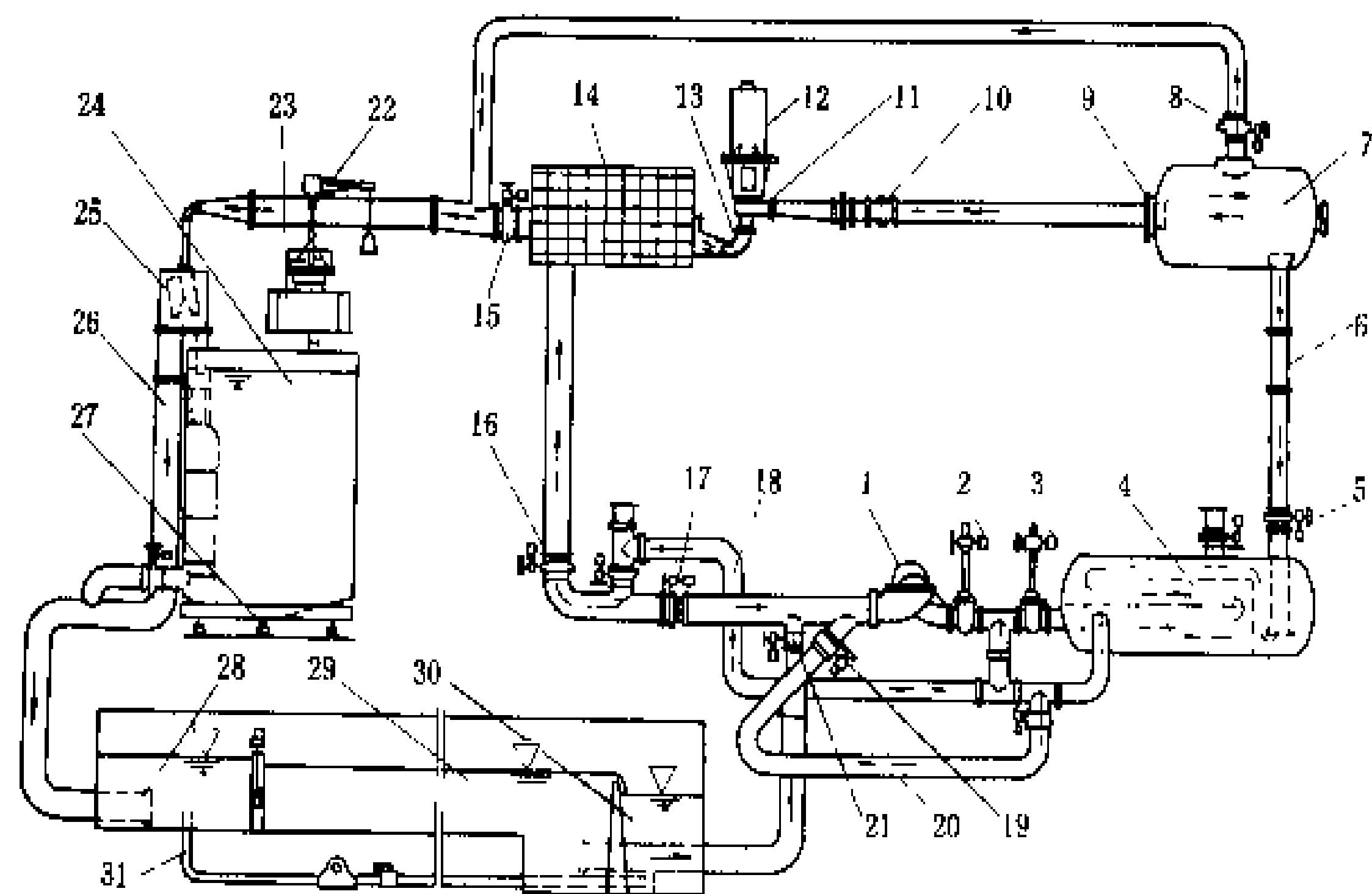
式中 Δp 为尾水管颈部测得的压力脉动双振幅值, m。

(5) 除去以上主要试验外还有: ①水流作用在转轮上的轴向水推力测量; ②作用在转轮叶片及导水叶上的水压力和水力矩测量; ③涡壳压差与过流量关系的测量; ④顶盖压力测量以及可逆式水轮机工况和水泵工况的各项性能试验。

水轮机模型试验台 一般有开敞式试验台和封闭循环式试验台, 用以测量能量、汽蚀等水轮机特性。水轮机模型通用试验台系统见图。

敞开试验时, 动力水泵 1 向压力水箱 7 供水, 压力水经电磁流量计 10 进入模型水轮机 13, 水流将能量传给水轮机后即排入供水池 28。

封闭循环试验时, 由模型水轮机 13 排出的水经尾水箱 14 返回动力水泵 1。



水轮机模型通用试验台系统图

1 动力水泵；2、3 电动闸阀；4 空气溶解箱；5—电动蝶阀；6—双向文丘里流量计；7 压力水箱；8 电动蝶阀；9 推力补偿器；10 电磁流量计；11—模型机组蜗壳及导水机构；12—测功电机及油压装置；13—模型水轮机；14—尾水箱；15、16、17 电动蝶阀；18 反向流水管；19 闸阀；20 反向流水管；21 电动蝶阀及吸水管路；22 精密天平；23 标准容积盛水箱；24—水体称重筒；25—充水切换用偏流器；26—通向蓄水池的管路；27 高精度负荷传感器；28—供水池；29—吸水池；30—溢流池；31—由溢流池向供水池补水的水泵和管路

反向循环试验时，动力水泵1经电动闸阀2、反向流水管18向尾水箱供水，压力水经模型水轮机13、

mm 转轮进行试验并向生产单位提供参数依据。

模型试验台精度 为确保模型水轮机各项性能准

一些水轮机模型试验台的误差指标

实验室名称	单项系统误差(%)				效率综合	效率综合	效率综合
	流量	力矩	水头	转速	系统误差(%)	偶然误差(%)	误差(%)
中国水利水电科学研究院	0.118	0.048	0.051	0.005	0.137	0.108	<0.2
哈尔滨大电机研究所	0.265	0.096	0.048		0.286		0.286
东方大电机研究所	0.043	0.041	0.156	0.02	0.168		0.25
洛桑工业大学	0.12~0.15	0.1	0.1~0.15	0.01	0.19~0.26	0.1	0.21~0.28
阿斯特洛研究所	0.227	0.102	0.102	0.02	0.27	0.1~0.2	0.29~0.34
英国国立工程试验室	0.17	0.1	0.05	0.01	0.20		<0.30
美国 AC 公司	0.25	0.109	0.038		0.275		<0.275
法国奈尔皮克公司	0.19	0.019	0.11	0.015			<0.30

确可靠，对流量、转速、力矩、水头等参数的测量十分严格，表中列出一些水轮机试验台的误差指标。
(青长庚)

shuilunji pai chu gaodu

水轮机排出高度 (drain height of water turbine) 冲击式水轮机水斗中心相对于下游水面的高度，用 H_D 表示，单位为 m。自针阀喷出的高速射流做功后由水斗排出时会溅起尾水下扰转轮运行，使效率、出力下降，根据实验统计，将水斗中心置于下游

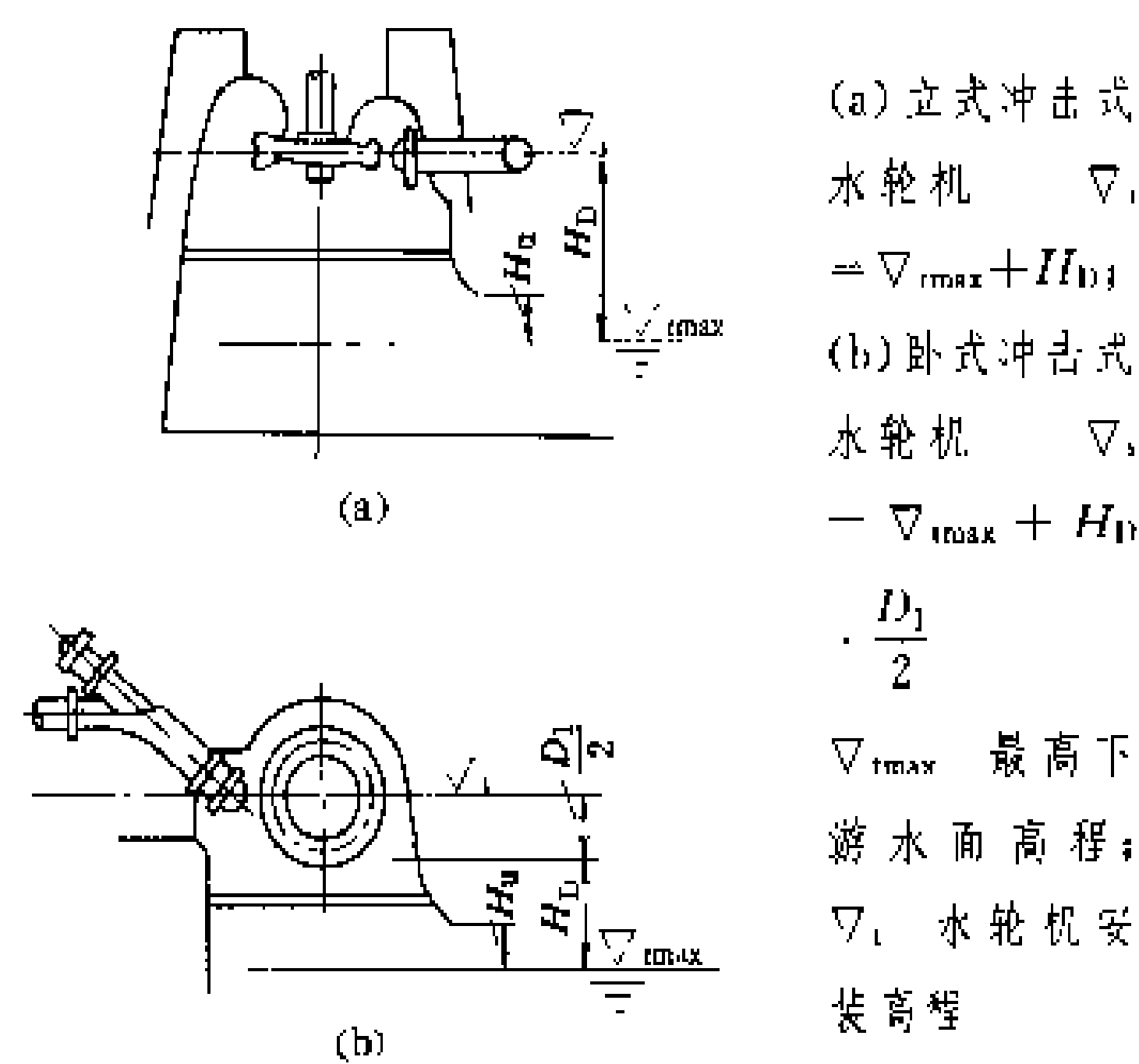
水面以上 $(1\sim1.5) D_1$ 处，可免除此影响，即 $H_D = (1\sim1.5) D_1$ ，式中 D_1 为转轮公称直径。 H_D 对立式机取大值，卧式机取小值。

为了保证水轮机长期安全运行，要根据求得的排出高度来确定水轮机安装高程。立式冲击式水轮机安装高程起算点为转轮水斗的水平中心线，卧式水轮机为主轴中心线，其计算及表示如图。

为避免尾水渠出流不畅或增减负荷时产生涌浪和回流导致机组震动、功率摆动甚至出力下降，在满足排出高度的同时，在水工建筑物与下游水面之间还应留

shui 水

有不小于 400 mm 的通风高度如图中 H_v 。



冲击式水轮机安装高程示意图

(青长庚)

shuilunji qishi he mosun

水轮机汽蚀和磨损 (cavitation and wear of water turbine)

汽蚀是指流道中水流汽化,出现气泡,气泡分裂、溃灭时对水轮机过流部件材料表面造成的破坏。磨损是含沙水流(浑水)对水轮机流道表面冲刷、摩擦造成的破坏。

汽蚀 水流通过水轮机时,其流向、流速随流道改变,在流速增高或脱流部位压力降低到汽化压力出现气泡,气泡进入高压区溃灭时便会出现汽蚀。

汽蚀的破坏作用 主要有机械、化学和电化学等破坏作用。

(1) 机械破坏作用。气泡溃灭时,造成几百甚至几千大气压的高频脉冲水锤压力,在无数个气泡溃灭的不间断打击下,金属表层遭到疲劳破坏。

(2) 化学破坏作用。气泡溃灭时,放出大量热量,使金属表面温度升高,可高达数百摄氏度,使金属表面受到氧化腐蚀。

(3) 电化破坏作用。气泡溃灭产生的高温使金属结晶粒子间形成热电偶,金属表面产生电解腐蚀。

汽蚀特征 初期材料表面失去光泽、颜色变暗进而变得粗糙发展成为麻点、针孔、海绵状或蜂窝状,严重时会使叶片穿孔甚至整块脱落。汽蚀发生时,在汽蚀部位会发出特殊的噪声和撞击声;水轮机会出现周期性的振动以及出力、效率下降;严重时在尾水管出口处可见到由气泡圈引起的形似闪光的现象。

汽蚀种类 分为叶形汽蚀、空腔汽蚀、间隙汽蚀。

(1) 叶形汽蚀。因转轮叶片和导水叶片的线形为非流线形或偏离最优工况运行引起脱流、负压而造成的汽蚀破坏。

(2) 空腔汽蚀。流道中因激流、涡带引起脱流、负压而造成的汽蚀破坏。

(3) 间隙汽蚀。流道中转动部件相互间以及与固定部件间构成的间隙流道,在高速水流下出现压力降低、脱流、负压所造成的汽蚀破坏。

导致汽蚀的因素 主要有:①叶片线形不好;②流速场变化过大;③流速过高;④流道表面不光滑;⑤材料金属疏、脆不抗汽蚀;⑥运行工况不佳;⑦维修不及时等。

减轻汽蚀的途径 通过提高水轮机设计、制造工艺水平,并从运行维护管理各方面分别采取措施,主要途径有:①降低模型水轮机的汽蚀系数;②改善叶片线形和提高表面光洁度;③采用抗汽蚀不锈钢材料;④合理选择水轮机参数;⑤正确选定水轮机安装高程;⑥尽量避免偏离设计工况区运行;⑦定期检查及时维修;⑧改善水质。

磨损 水轮机处在有压流情况下的部件表面受含沙水流的磨削、撞击后,其表面呈现光滑且具有金属光泽。

导致磨损的因素 主要有水流、泥沙和材质 3 个方面:

(1) 水流特性。水流速度和水流方向是导致磨损的主要因素之一,一般认为磨损量与流速的三次方成正比,与水流作用于金属表面的冲角成正比。

(2) 泥沙特性。包括含沙量、泥沙成份、硬度、颗粒大小和形状,含沙量愈大,泥沙愈硬如石英、褐铁矿、黄铁矿、石榴石等,粒径愈大(指大于 0.1 mm),沙粒呈棱形时磨损愈重。

(3) 材质特性。包括流道材料成份、金相组织和硬度等,一般以材料的耐磨系数划分耐磨性能好坏,以 ZG30 的耐磨系数为 1 比较,1Cr18Ni9Ti 板材为 1.2~1.8、ZG0Cr13Ni4Mo 为 1.2~2.0、20Cr5Cu 板材为 2.0~3.0,堆 642 电焊条≥4.0(耐磨 1 号)。

磨损失重 导致磨损的因素是多方面的,瑞士人 C. 伊尔盖斯对平面受含砂射流水束进行的磨损研究试验得到下列结果

$$\Delta G = K S^{0.7} C_s^{0.7} v^{2.7-3.0} / \sqrt{R_c} \sin \alpha$$

式中 ΔG 为试件的单位时间失重; S 为射流断面积; C_s 为水流含砂浓度; v 为射流速度; K 为与砂粒形状、粒径、硬度等有关的系数; R_c 为试件材料的洛氏硬度; α 为射流对材料表面的冲击角度,适用于 $\alpha=90^\circ\sim30^\circ$,当 $\alpha<30^\circ$ 时磨损量迅速减少。

减少磨损的途径 目前对多泥沙电站多结合电站工程采取沉沙、排沙、冲沙等措施,尽量减少过机含沙量,避免推移质泥沙进入水轮机。引水式水电站多在首部设立专门的沉沙池、沉沙底坎和相应的排沙道,并在

进水口部位较低高程建设冲沙道减少淤积。坝式水电站还结合枢纽布局在大坝两侧或中部较低处建设冲沙底孔冲沙,汛期还采取降低库水位运行以冲沙保库,含沙量特大的中国三门峡、青铜峡水电站还在每台水轮机底部建设排沙道来排沙。

汽蚀和磨损联合作用 在浑水条件下水轮机中除去有压区流道表面会受到磨损外,其他部位的表面破坏都是汽蚀和泥沙磨损联合作用的结果。在负压或正压、负压交替出现的部位表面,由于泥沙的汽蚀核子作用使汽蚀现象提前且加剧发生,使流道表面变得疏松,因汽蚀生成的氧化膜在泥沙水流的冲刷磨削下难以形成,疏松组织容易被泥沙冲磨掉,形成的表面很不规则,使脱流加剧,汽蚀加重,如此反复作用,造成了远比单纯汽蚀更加严重的快速破坏。

汽蚀磨损特征 主要特征表现为:①初期表面失去光泽,颜色变暗进而发展成麻点、鱼鳞状的坑、槽沟、穿孔甚至部分脱落,被破坏的表面呈银白色或咖啡色,开始发亮,逐渐变暗。②汽蚀加磨损时外部表现与汽蚀一样只是程度更甚,经过一段时间运行后水轮机的出力和效率会有所降低。

汽蚀磨损失重 国际国内尚无公认的计算理论,工程上尚处在探索阶段。

两种观点 目前对水轮机过流部件在浑水条件下受到破坏的原因有磨损论和汽蚀论两种完全不同的观点。

磨损论认为浑水条件下过流表面损坏,除去海绵状的汽蚀损坏外,鱼鳞坑、沟槽等破坏都是典型的泥沙磨损而不是汽蚀,应采取抗磨的方法来解决。

汽蚀论认为被磨损的表面是光滑的渐变的,鱼鳞坑、沟槽等破坏起源于过流表面材料的微观缺陷,如针孔、气眼、表面粗糙、材质疏松等引起的汽蚀发展而成,鱼鳞状破坏又给汽蚀的发展创造了条件,泥沙的汽蚀核子作用又使汽蚀提前发生并加剧,造成了沟、槽、缺口等破坏。应采取消除汽蚀的方法来解决。

汽蚀与磨损参见彩图插页第24页第45、46图。

(青长庚)

shuilunji shuiya maidong

水轮机水压脉动 (pressure fluctuation of water turbine)

水轮机过流通道中,水流压力围绕其平均值作交替性的随机变化。它是使水轮发电机组产生振动的主要原因之一,这类振动常具有随机性,且与水轮机的运行工况有关,尤其当混流式或轴流定桨式水轮机在远离最优工况的高水头、低负荷区运行时,尾水管内涡带引起的低频水压脉动,将导致机组不能稳定运行,甚至使转轮遭到破坏,激起电站水工建

筑物的振荡等。

水轮机水压脉动的成因 按其产生的原因,可分为尾水管涡带、叶栅绕流、卡门涡、迷宫环间隙变动、蜗壳或导水叶引水不均匀以及顶盖至尾水管的水力谐振等。

(1)尾水管涡带引起的水压脉动。由于水轮机运行偏离设计工况,尤其在低负荷运行区域,转轮出口水流不是法向,水流的旋转引起强烈的漩涡流动而形成螺旋形的带状,称为涡带。从转轮出口一直延伸到尾水管肘管底部,其形态随工况的变化而变化,并以0.2~0.5倍机组转动频率的频率,按机组旋转方向围绕尾水管中心旋转,引起周期性的压力变化。

(2)转轮叶栅绕流引起的水压脉动。两相邻叶片间间隙及其进、出水口的流速和压力的不均匀分布,使转轮的上、下游水流产生扰动形成压力脉动。其幅值随转轮叶片数的减少或机组过流量的增加而增强,其频率为叶片数与机组转动频率的乘积,且衰减较快。另外,在偏离最优工况后的小负荷区时,由于转轮叶片进、出口的水流冲击和脱流所引起的水压脉动,其幅值和频率的变化都是随机性的,都可能引起叶片的共振。

(3)卡门涡引起的水压脉动。恒定流束绕过物体时,在其后面的两侧出现漩涡,形成旋转方向相反、有规则交错排列的线涡,进而互相干扰、互相吸引形成非线性的涡列,俗称卡门涡。在水轮机固定导叶、活动导叶和转轮叶片等的出水边常产生卡门涡现象,当其出现频率接近于转动体的固有频率时,将产生共振并伴有较强的且频率比较单一的噪声和金属共鸣声。

(4)迷宫环间隙不均引起的水压脉动。由于迷宫环动、静部分的偏心,使迷宫环转动部分和固定部分之间的间隙出现周期性的变化,其中将产生一个瞬时不均匀或中心不成对称的旋转压力场,而形成压力脉动。

(5)蜗壳或导水叶引水不均引起的水压脉动。由于加工和安装误差,使导水叶叶片、流道的形状与尺寸差别较大时,对水流将产生扰动,扰动水流在进入转轮区时,就会与转轮发生冲击而引起压力脉动。在空载或低负荷运行时均能使机组产生强烈的振动。

(6)顶盖至尾水管的水力谐振。经过转轮上、下迷宫止漏装置漏入尾水管的水流,在一定水头和导水叶开度下将产生水力谐振而出现强水压脉动,引起顶盖和机组承重支架随机性的轴向高频振动和噪声。

(7)运行工况劣化所引起的水压脉动。如机组在高水头、低负荷或低水头、低负荷等非设计工况区运行,以及水轮机、水泵的起动、甩负荷、断电及飞逸等过渡工况运行时,其水压脉动的幅值比稳定运行时显著增大。发电机的功率摆动亦将引起随机性的水压脉动。



水压脉动的测量 为掌握水压脉动的规律，并分析它们对机组振动的具体影响，需选择适当的压力表或压力传感器，目前广泛应用的是压阻式传感器，它的灵敏度很高，无需放大器，其输出可直接进行记录。用示波器或磁带记录仪记录测点信号随时间而变化的波形，并分析计算出各测点随工况变化的振幅与频率。

由于不同原因引起的水压脉动的位置分布不同，因此测点应当选择在最能代表该种水压脉动特性的位置上，并均以流道壁面上的测量结果为依据，以便对比分析。例如：测尾水管涡带水压脉动时，测点应设在尾水管直锥段进口以下 0.4~0.5 倍转轮直径处的管壁上；分析叶栅绕流或卡门涡引起的水压脉动时，测点应设在转轮进、出口处；分析迷宫止水装置中的水压脉动时，测点应设在其高度的中部或进、出口处；分析发电机功率摆动时，测点应布置在压力钢管末端或蜗壳进口处。可按试验任务和现场具体施测条件取舍。

减轻水压脉动的措施 对运行机组而言，改造其水下部件的结构将受到限制，可通过分析原型试验结果以了解水压脉动特性再采取针对性措施。①避开不稳定运行区，优选运行工况。②在转轮上、下采取一些稳定水流的措施，如在转轮出口附近沿尾水管直锥段周围管壁上装设用以削弱尾水管内水流的圆周分量、破坏涡带的形成和发展的装置。③向顶盖下方空腔补气，可利用大轴中心孔或尾水管中心补气装置进行自然补气或强迫补气，以减小涡带在尾水管断面上的偏心矩。④通过配重处理或适当调整轴瓦间隙，以减小转动部分的运行摆度。⑤减薄转轮叶片出水边的厚度及改变其形状，以改变卡门涡的频率；或在转轮叶片间加支撑以改变叶片的固有频率，以免发生共振。

(刘丽果)

shuilunji tezhen shui tou

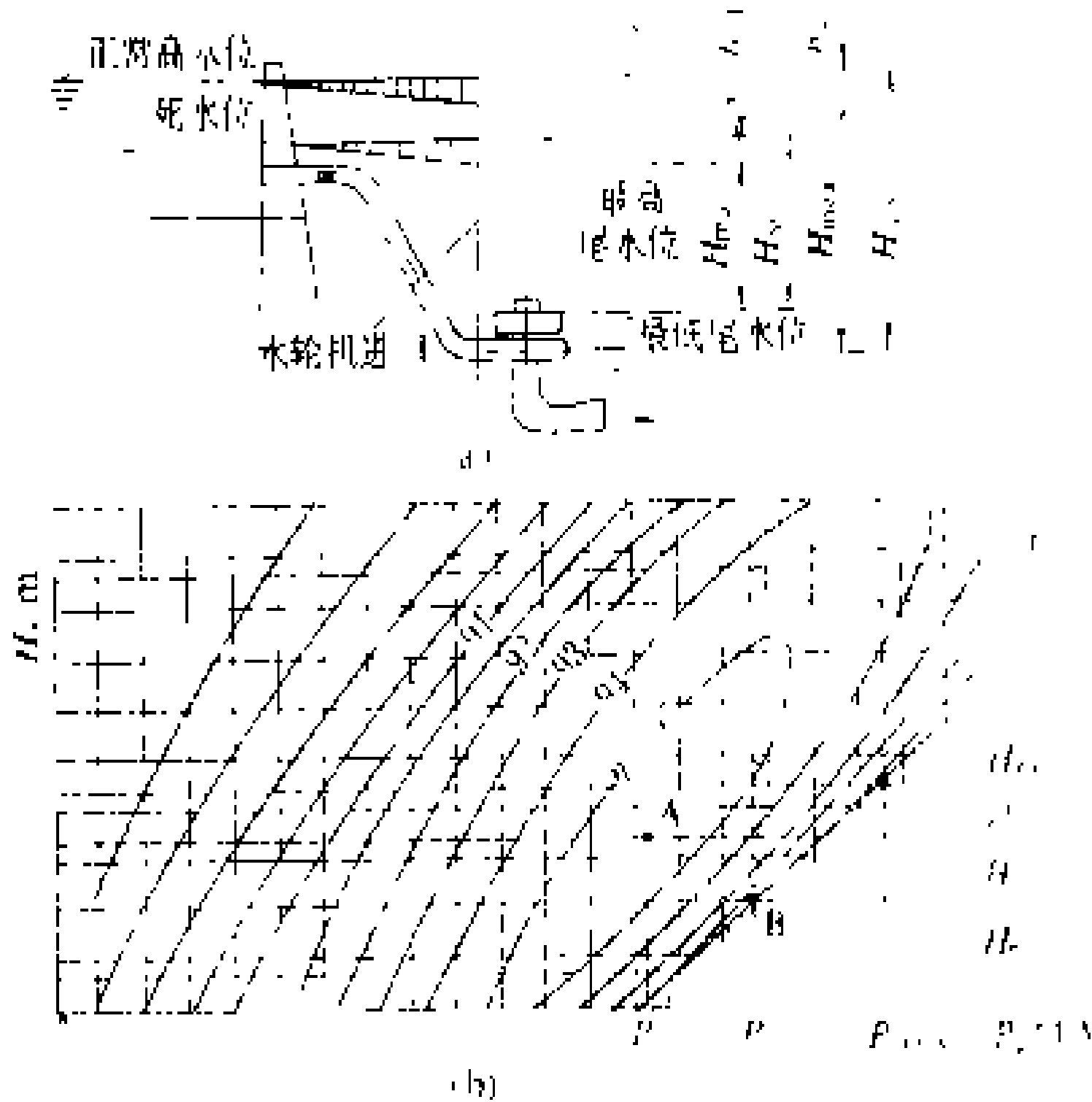
水轮机特征水头 (characteristic head of water turbine) 水轮机设计和运行采用的表征水轮机各种特性的水头。参见图。

(1) 水轮机最大水头 H_{max} ，见图 (a)。其值为电站最大水头 H_{max} 减去机组空载运行时引水系统水头损失 h_{g1} 和尾水管出口损失后的工作水头，是水轮机转轮承受的最大水头。电站最大水头为上游水库正常蓄水位与下游最低尾水位之差值。

(2) 水轮机最小水头 H_{min} ，见图 (a)。其值为电站最小水头 H_{min} 减去机组满载运行时引水系统水头损失 h_{g2} 和尾水管出口损失后的工作水头。电站最小水头为上游水库死水位与下游最高尾水位之差值。

(3) 水轮机加权平均水头 H_{av} 。其值是通过水库运行计算确定的净水头。在该水头与水轮机最大水头之

间所发电量同该水头与水轮机最小水头之间所发的电量相等。



水轮机特征水头示意图

- (a) 水轮机最大、最小水头示意图；
- (b) 水轮机运转特性曲线

H_{max} 、 H_{min} 水轮机最大、最小水头； h_{g1} 、 h_{g2} 引水道水头损失； H_d —水轮机设计水头； H_r —水轮机额定水头； H_{gmin} —发电机发出最大出力的最小水头； P_r —发电机额定出力； P_{max} —发电机可发出的最大出力； P_0 —发电机空载

(4) 水轮机设计水头 H_d ，见图 (b)。其值为所设计水轮机的理想水头的净水头，在该水头下水轮机达到最高效率。设计水头一般接近加权平均水头。

(5) 水轮机额定水头 H_r ，见图 (b)。其值为水轮机的铭牌水头，在该水头和 100% 的导水叶开度下机组发出额定出力。

(6) 发电机发出最大出力的最小水头 H_{gmin} ，见图 (b)。其值为发电机发出最大出力（一般为额定出力的 105%~115%）时，水轮机所需最小水头的净水头。

(青长庚)

shuilunji tiaosugui

水轮机调速器 (water turbine governor)

调节水轮机的转速和出力的自动装置。通过调速器控制进入水轮机转轮的流量来调节水轮发电机的有功功率和转速，并实现机组起动、停机、调相、发电等工况间的相互转换操作。调速器可以根据不同的方法进行分类。按调速器调节规律分，有比例-积分 (PI) 调速器和比例-积分-微分 (PID) 调速器。按执行机构的数目分，有单调节调速器和双重调节调速器。单调节调速器用于混流式水轮机和轴流定桨式水轮机，双重调节调速器用于轴流和斜流转桨式、冲击式和带有调压阀的混流式水轮机。按元件结构的不同，调速器分为机



械液压型调速器和电气液压型调速器。不同类型的调速器各国均规定有相应的技术条件,总的要求是:①在电力系统小波动条件下,调速器应保证机组在各种运行工况下的稳定性。②机组在空载运行时,调节过程应满足最大超调量、超调次数、动态过程调节时间的要求。③机组甩负荷后,调节过程应满足转速变化的波峰、调节时间等要求。④还应满足调速器的不灵敏区、静态特性的非线性程度等要求。

机械液压型调速器 其结构简图见图 1。飞摆由与水轮机同轴的永磁发电机供电的飞摆电动机驱动,是测速部件。水轮机转速偏离额定值时,飞摆旋转转速也随之变化。在飞摆重块离心力的作用下使得 P_0 点离开正常位置, C 点也随之偏离,并带动主配压阀的活塞移动使压力油进入主接力器关闭或开启水轮机导水叶,改变流入水轮机的水流流量使水轮机的转速回到原来的额定转速。主配压阀和主接力器组成液压放大装置用来放大信号的功率和幅值。有些机械液压型调速器有两级液压放大装置。缓冲器是暂态反馈元件,把主接力器行程信号以暂态负反馈的形式送到液压放大装置的输入端,以保证调节系统的稳定。永态反馈元件是将主接力器行程信号以永态负反馈的形式送到液压放大装置的输入端,使调节系统的静特性成为有差特性,从而使并列运行的机组间可以按有差特性进行负荷分配。转速调整机构由螺母、螺杆和操作机构组成,用来改变 R_0 和 C 的位置,从而打开或关闭导水叶,人为地使机组的转速改变为一个新的稳态值。

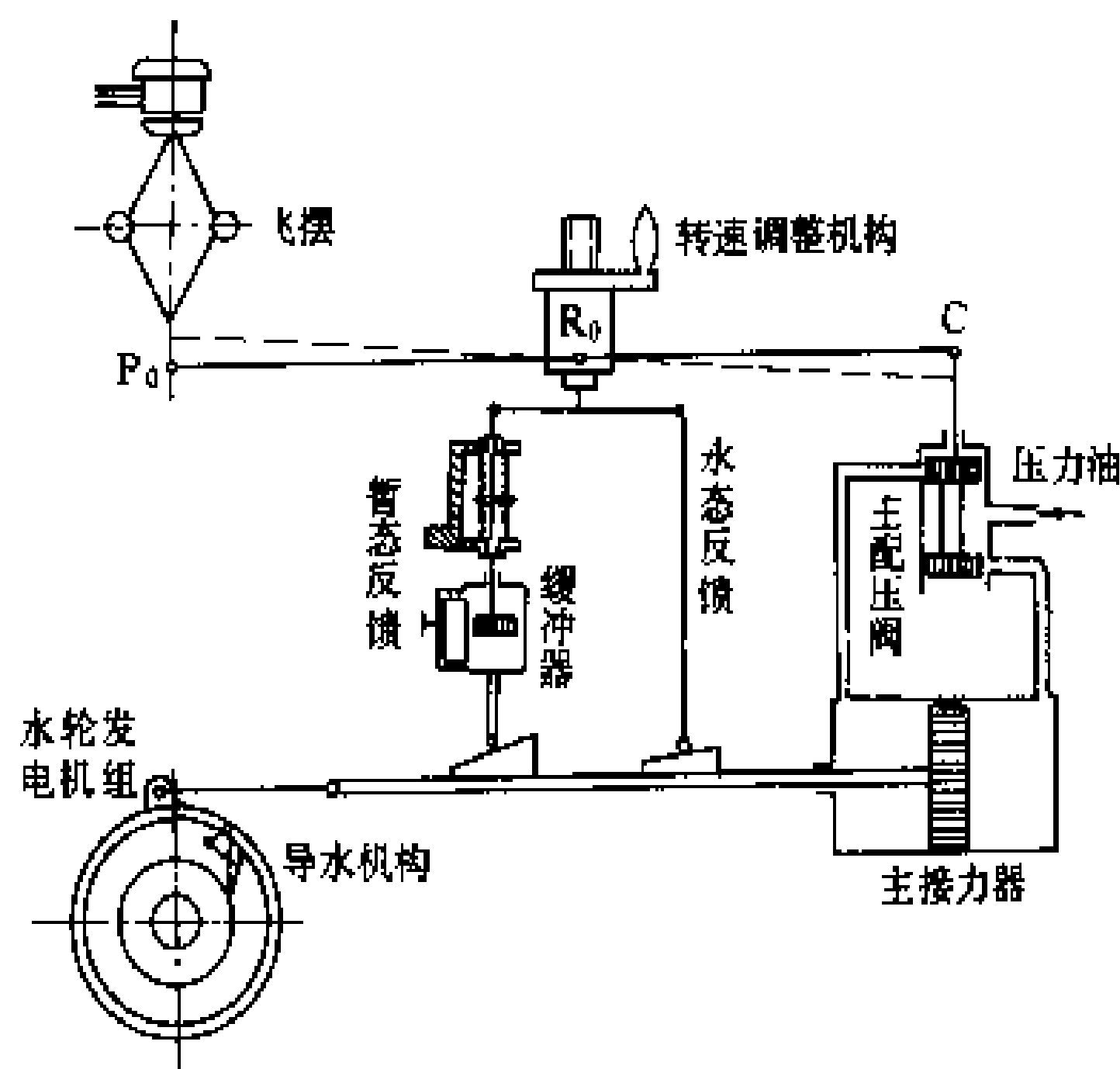


图 1 机械液压型调速器结构简图

电气液压型调速器 其方框图见图 2。电气液压

型调速器的测频回路、放大回路、微分回路、调差回路、转速给定和功率给定单元均由电气回路构成,装在电气柜内。液压放大装置由引导阀、辅助接力器和主配压阀、主接力器等机械器件构成,除主接力器外均装设于机械柜内。测频回路用来构成测速装置,微分回路用来构成暂态反馈,调差回路用来构成永态反馈。电液转换器将电气回路输出的电信号转换成机械位移信号以驱动引导阀。位移传感器将接力器的位移转换成信号以便与其他电信号进行综合。电气液压型调速器灵敏度高,调节系统死区小,稳定性和速动性好。还可以接受

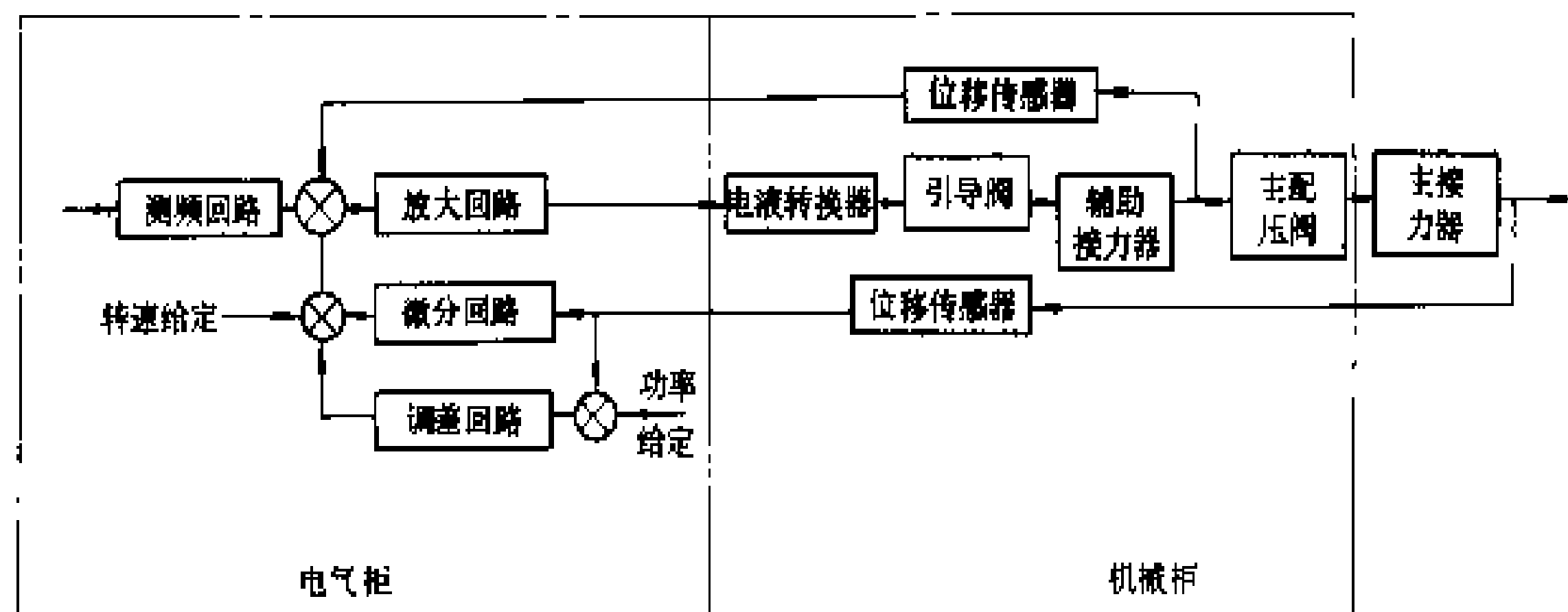


图 2 电气液压型调速器方框图

多种电信号,适应各种需要。因此,大型水轮发电机组现在都采用电气液压型调速器。

简史 机械液压型调速器是在 20 世纪前期发展起来的,30 年代其性能已相当完善,现在生产的机械液压型调速器与 30 年代的类型基本相同。1939 年瑞士首先推出了电子管电气液压型调速器,50 年代以来电气液压型调速器获得了迅速发展,并经历了从电子管、晶体管到集成电路等几个发展阶段。随着微机的出现和计算机应用技术的普及和发展,70 年代后期微机电气液压型调速器相继研制成功和投入试运行。80 年代一些厂商推出了微机电气液压型调速器产品。微机电气液压型调速器具有许多优点,预期将在大中型水轮机上越来越多地得到采用。

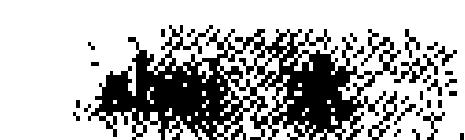
参考书目

沈祖诒主编. 水轮机调节. 第二版. 北京: 水利电力出版社, 1988

(张学中)

shuilunji xichu gaodu

水轮机吸出高度 (suction height of water turbine) 反击式水轮机转轮内压力最低点相对于下游水面的高度,用 H_s 表示,单位为 m。反击式水轮机转轮叶片背面近出水边处的压力最低,是汽蚀的早发区,为避免其受到汽蚀损坏,选用适宜高度 (H_{s0}) 的水柱来限制该处的真空值。实用中不同形式水轮机压力最低点的准确位置很难确定,实践中采用:立

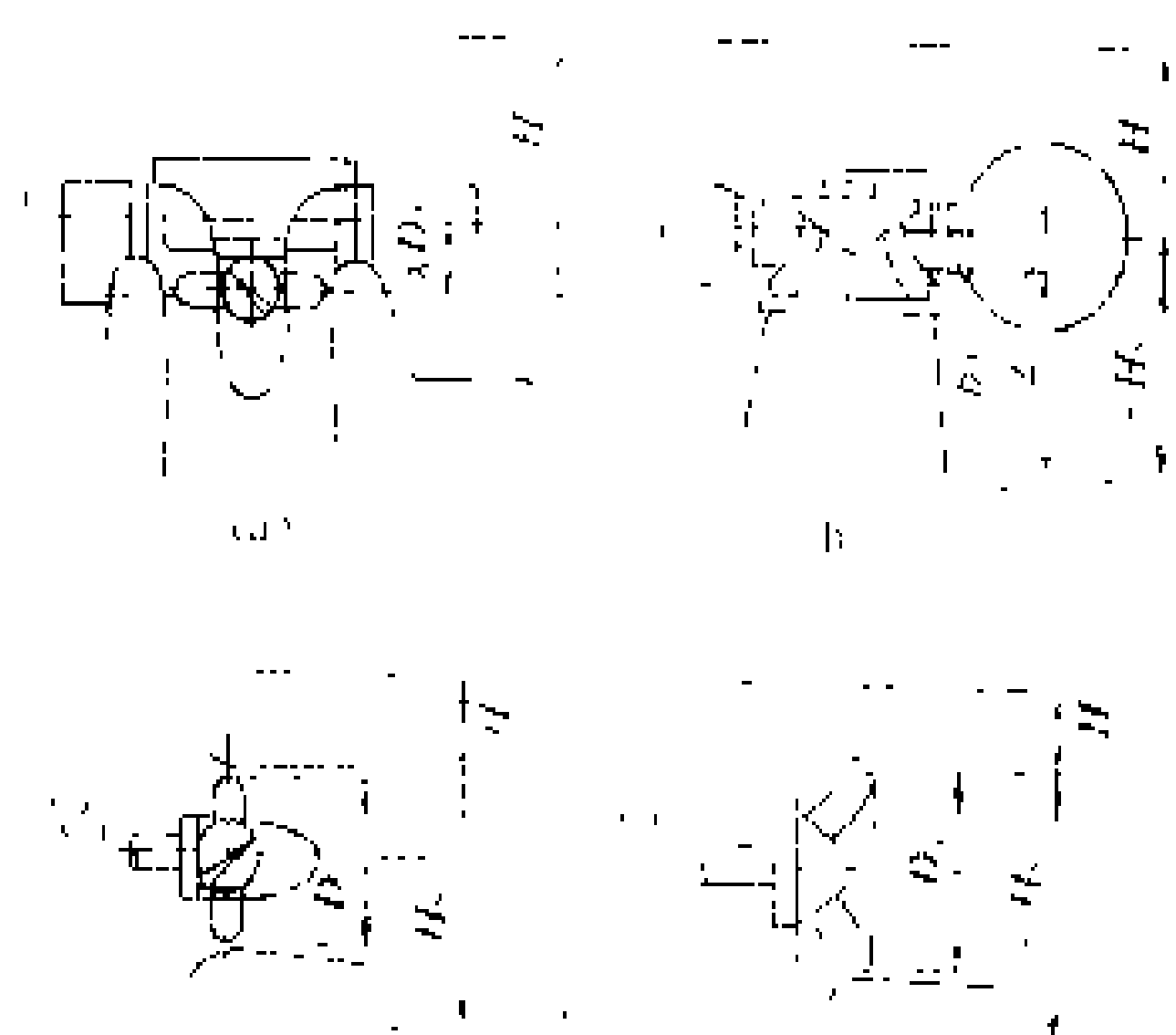


式轴流式水轮机为转轮叶片的转轴中心线；立式混流式水轮机为底环上平面高程；卧式水轮机为转轮叶片的最高点。吸出高度用下式计算

$$H_s \leq 10 - \frac{\nabla}{900} - \sigma_p H_n$$

式中 ∇ 为电站厂房位置的地面海拔高程，m； $\frac{\nabla}{900}$ 为大气压力修正值； $\sigma_p = K_s \sigma_m$ 为装置汽蚀系数； H_n 为水轮机额定水头，m。

为了保证水轮机长期安全运行，要根据求出的吸出高度来确定水轮机安装高程。反击式水轮机安装高程是水轮机导水叶中心线或轴线的海拔高程，计算及表示如图。



反击式水轮机安装高程示意图

(a) 立式轴流式水轮机 $\nabla_i = \nabla_t + H_s + x D_1$ ；

(b) 立式混流式水轮机 $\nabla_i = \nabla_t + H_s + \frac{b_0}{2}$ ；

(c) 卧式水轮机 $\nabla_i = \nabla_t + H_s \pm \frac{D_1}{2}$

∇_t —下游水面高程； b_0 —导水叶高度； x —系数 ≈ 0.41 ；

D_1 —转轮公称直径； ∇_i —水轮机安装高程

(青长庚)

shuilunji xiangsi lilun

水轮机相似理论 (similitude theory of water turbine)

研究模型水轮机和原型水轮机满足相似条件下各种特性参数相互关系的规律。根据相似理论，进行水轮机模型试验，并由试验结果换算出水轮机单位参数、比转速和得到水轮机综合特性图，以指导原型水轮机设计和制造。模型水轮机和原型水轮机相似，必须满足几何相似、运动相似和动力相似三个条件。

几何相似 原型水轮机和模型水轮机的转轮、导水叶(见导水机构)蜗壳尾水管等各部分的形状相似、

叶片数相同、叶片安放角度相等和各线形尺寸成相同比例。转轮和导水叶相似如图 1 和式 (1)、(2) 的关系

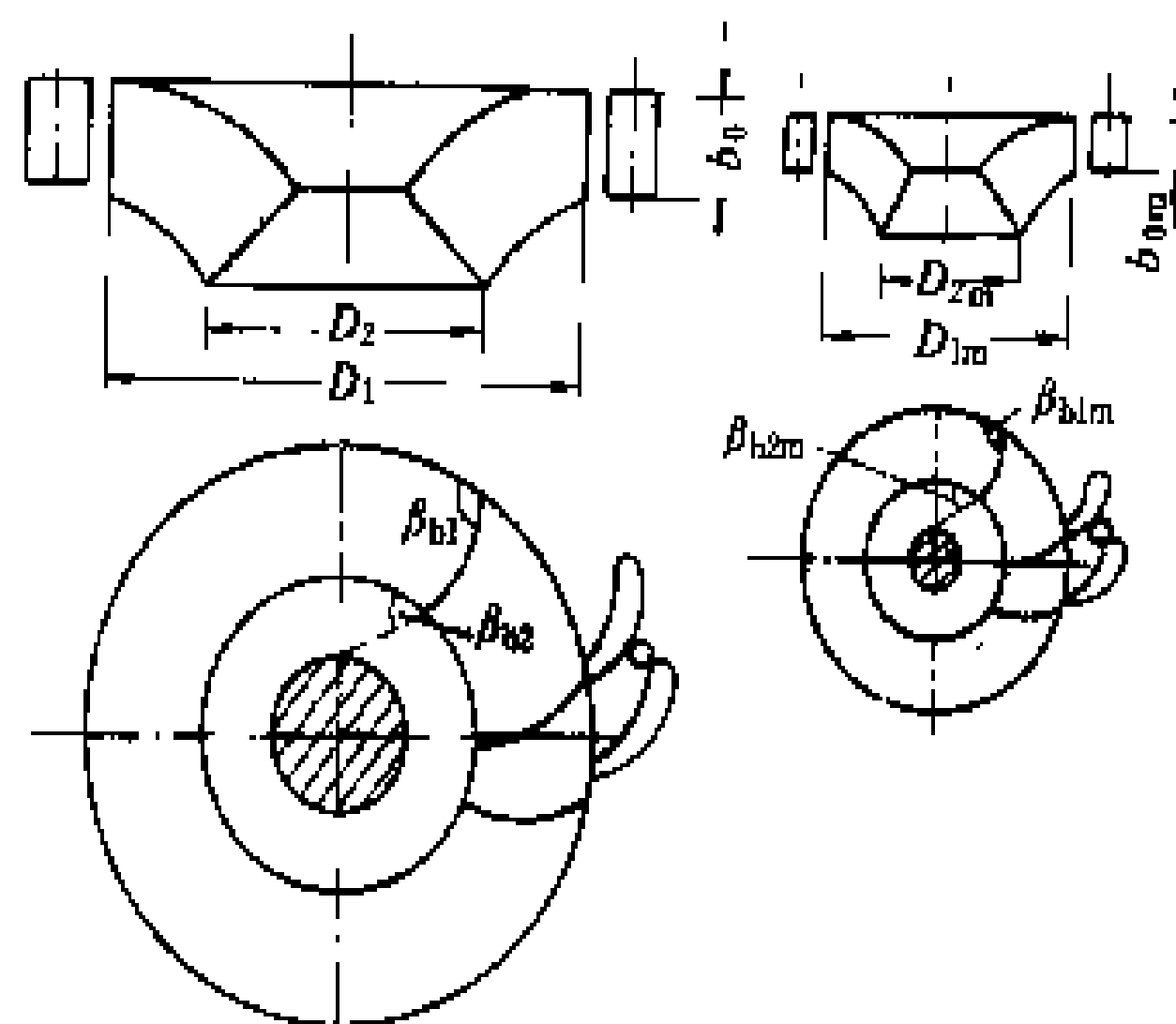


图 1 几何相似

$$\frac{D_1}{D_{1m}} = \frac{D_2}{D_{2m}} = \frac{b_0}{b_{0m}} = \frac{a_0}{a_{0m}} = \lambda \quad (1)$$

$$\beta_{b1} = \beta_{b1m} \quad (2)$$

式中 D_1 、 D_2 为原型转轮的进、出口直径； D_{1m} 、 D_{2m} 为模型转轮的进、出口直径； b_0 和 b_{0m} 分别为原型和模型导水叶的高度； a_0 和 a_{0m} 分别为原型和模型导水叶的开度； λ 为尺寸比例系数； β_{b1} 和 β_{b1m} 分别为原型和模型转轮叶片的进口角。

式 (1)、(2) 只当原型和模型水轮机的导水叶分布圆直径 (D_0) 也成相同比例、导水叶数 (Z_0) 相等、导水叶形状几何相似时才成立。当 $D_0 \neq \lambda D_{0m}$ 时， a_0 值将有所变化。当导水叶数 $Z_0 < Z_{0m}$ 时，原型水轮机的导水叶开度 a_0 应大于 λa_{0m} ，否则会引起出力不足。

运动相似 模型水轮机和原型水轮机流道中各相应点水流的方向相同、大小呈相同比例，即各相应点水流质点的圆周速度、相对速度和绝对速度所构成的速度三角形 (见图 2) 相似，即

$$\frac{u_1}{u_{1m}} = \frac{v_1}{v_{1m}} = \frac{w_1}{w_{1m}}$$

$$\alpha_1 = \alpha_{1m}$$

$$\beta_1 = \beta_{1m}$$

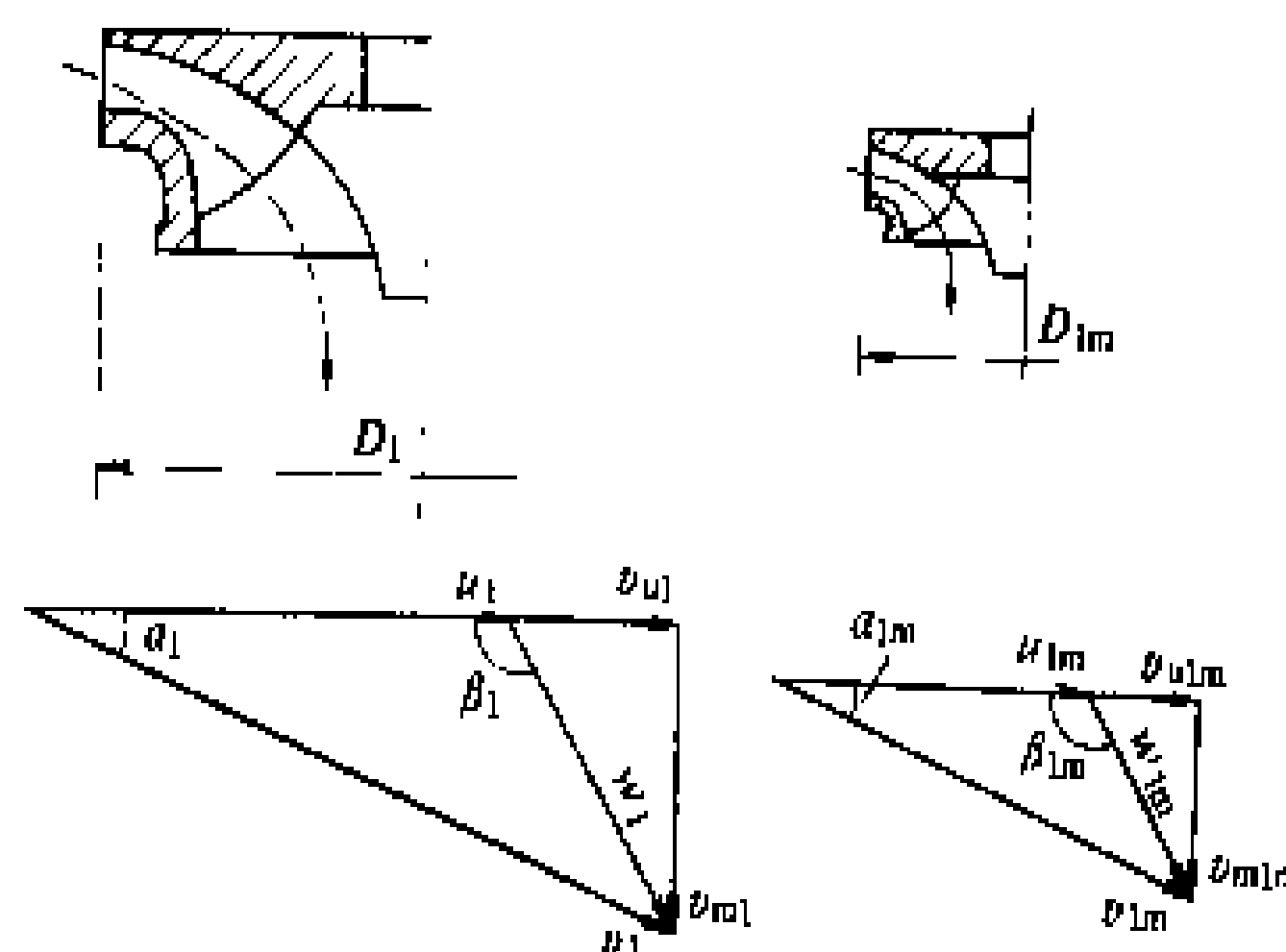


图 2 速度三角形相似

式中 u_1 、 u_{1m} 分别为原型和模型转轮进口的圆周速度，m/s； v_1 、 v_{1m} 分别为原型和模型转轮进口的绝对速度，m/s； w_1 、 w_{1m} 分别为原型和模型转轮进口的相对速度，m/s； α_1 、 α_{1m} 为原型和模型转轮进口绝对速度与圆周速度之夹角； β_1 、 β_{1m} 为原型和模型转轮进口相对速度与圆周速度之夹角。

动力相似 模型水轮机和原型水轮机流道中各相应点上水流质点所受的压力、惯性力、粘滞力和重力等外力，方向相同、大小成比例以及相同的边界条件，即雷诺数 Re 、弗劳德数 Fr 、斯特鲁哈尔数 Sh 相等。

$$\text{雷诺数} \quad Re = vL/\nu$$

$$\text{弗劳德数} \quad Fr = v^2/gL$$

$$\text{斯特鲁哈尔数} \quad Sh = vT/L$$

式中 v 为流速； L 为特征尺寸； T 为表征现象周期性的时间； ν 为运动粘度； g 为重力加速度。

(青长庚)

shuilunji xiaolu

水轮机效率 (efficiency of water turbine)

水轮机轴输出的功率与输入水轮机水流功率之比值，用 η 表示

$$\eta = \frac{P}{9.81QH} \quad (1)$$

式中 P 为水轮机轴输出的功率，kW； Q 为单位时间内流经水轮机的流量，m³/s； H 为水轮机工作水头，m。

水轮机将水能转换为机械能的过程中有三种损失：①水轮机容积损失。进入水轮机的流量有一小部分从旋转与固定部件间的间隙漏掉了。②水轮机水力损失。水流在水轮机内流动过程中因沿程摩擦、漩涡、脱流等引起的损失。③水轮机机械损失。在轴承、轴封上的机械摩擦和转轮在空气中(冲击式)旋转因摩擦引起的损失。

水轮机的效率系指水轮机本体的效率。反击式水轮机从蜗壳进口计算到尾水管出口；冲击式水轮机从针阀引水管进口计算到水斗出口。不同型式水轮机因结构和运行工况不同，损失和效率各异。一般情况，冲击式水轮机随流量变化的效率曲线平缓，但最高效率偏低；混流式水轮机的最高效率较高但低负荷的效率较低；轴流定桨式水轮机的最高效率略高于转桨式，但偏离最优工况后效率急剧下降；轴流转桨式水轮机因具有双重调节机构其效率曲线较定桨式及混流式平缓。各型水轮机在水头 H 、转速 n 恒定条件下的 $P-\eta$ 曲线如图 1。

水轮机的效率可根据其模型水轮机的效率用相似理论公式换算得到，也可以在水电站实际测量得到。

水轮机效率换算 一般按国际电工委员会(IEC)

推荐的下述公式进行换算。

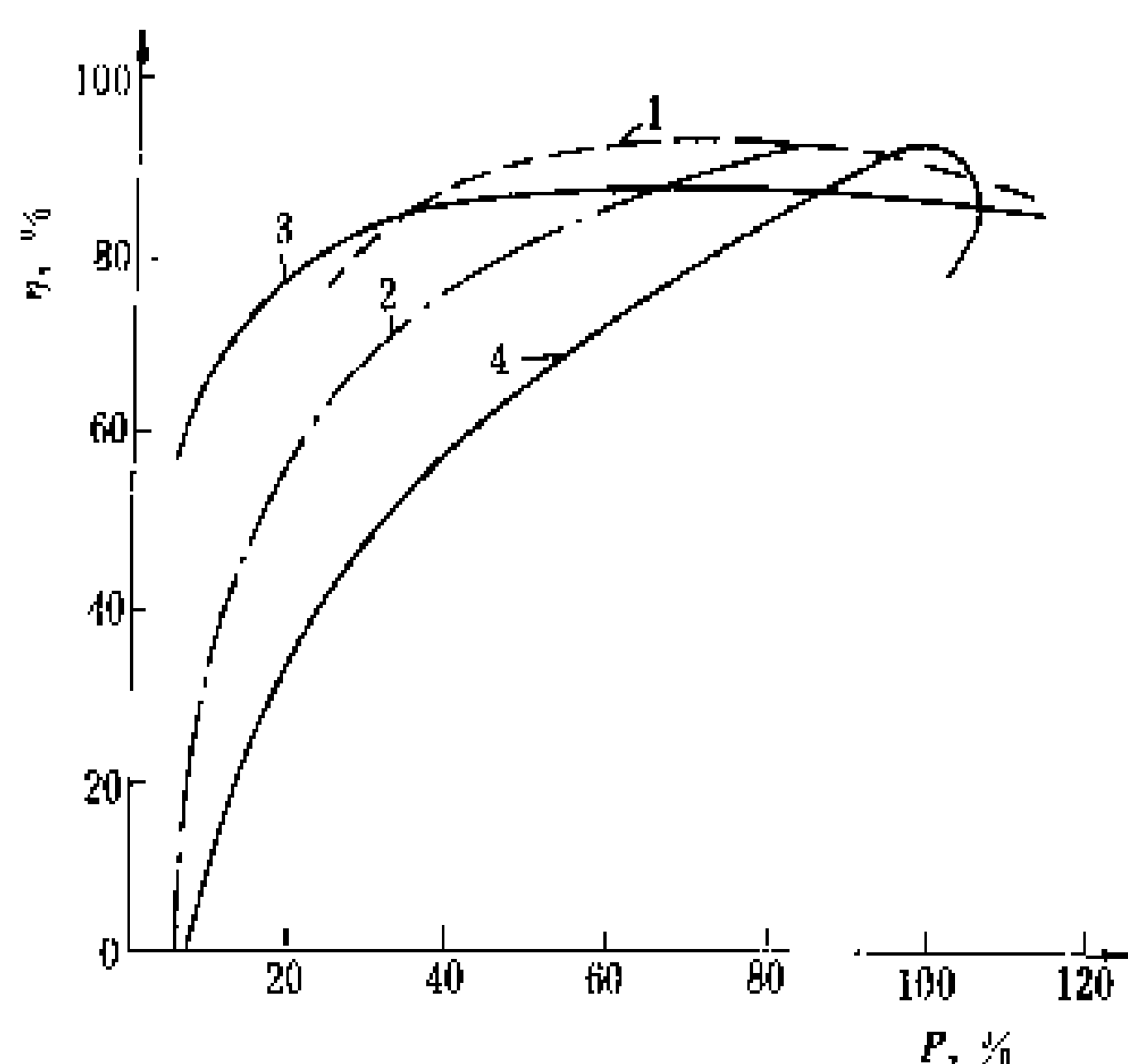


图 1 不同型式水轮机效率曲线图

1- 转桨式， $n_s=625$ ；2 混流式， $n_s=300$ ；3 水斗式， $n_s=20$ ；4 定桨式， $n_s=570$

对混流式水轮机

$$\eta_{1max} = 1 - (1 - \eta_{mmax}) \sqrt[5]{\frac{D_m}{D_1}} \quad (2)$$

对轴流式水轮机

$$\eta_{1max} = 1 - 0.3(1 - \eta_{mmax}) - 0.7(1 - \eta_{mmax}) \times \sqrt[5]{\frac{D_m}{D_1}} \sqrt[10]{\frac{H_m}{H_1}} \quad (3)$$

对冲击式水轮机

$$\eta_1 \approx \eta_m \quad (4)$$

式中 η_1 为原型水轮机的效率，%； η_m 为模型水轮机的效率，%； D_m 为模型水轮机的公称直径，cm； D_1 为水轮机的公称直径，cm； H_m 为模型水轮机工作水头，m； H_1 为原型水轮机工作水头，m；下角标 max 为最大值(对转桨式水轮机为叶片转角下的最大值)。

因原型水轮机的尺寸比模型水轮机大等因素，原型水轮机效率都大于模型水轮机效率，其增值为

$$\Delta\eta = \eta_{1max} - \eta_{mmax} \quad (5)$$

由于水轮机效率的提高相当于工作水头的增大，因此通过水轮机的流量也要增大，其单位流量增值

$$\Delta Q_{10}' = Q_{10}' \left(\sqrt{\frac{\eta_{1max}}{\eta_{mmax}}} - 1 \right) \quad (6)$$

同样理由，单位转速也有所增大，其增值为

$$\Delta n_{10}' = n_{10}' \left(\sqrt{\frac{\eta_{1max}}{\eta_{mmax}}} - 1 \right) \quad (7)$$

式中 Q_{10}' 为模型水轮机最优单位流量，L/s； n_{10}' 为模型水轮机最优单位转速，r/min。

因此，按照模型试验得到的水轮机综合特性图绘制水轮机运转特性曲线图或计算水轮机的各项与水头有关的数据时，必须考虑这些增值的影响而要对其修



正。为了简化计算工作，一般令

$$\eta_t = \eta_m + \Delta\eta \tag{8}$$

$$Q_t = (Q_1' + \Delta Q_1') D_1^2 \sqrt{H_t} \tag{9}$$

$$H_t = n D_1 / (n_1' + \Delta n_1')^2 \tag{10}$$

$$P_t = 9.81 Q_t H_t \eta_t \tag{11}$$

式中 Q_1' 为模型水轮机单位流量, L/s; n 为水轮机额定转速, r/min; 下角标 t 为原型水轮机。

实测水轮机效率 在水电站实测水轮机效率主要是测定水轮机的工作水头 H 、流经水轮机的流量 Q 和由水轮机轴输出的功率 P , 见式 (1)。工作水头多用高精度压力表测定, 对于中、低水头还可使用 U 形水银计测定。流量测定方式很多, 有测流堰法、流速仪法、盐幕法、水锤法、超声波法、电磁法、文丘里法和热力学法等, 超声波法和电磁法的测量精度较高, 当水头大于 300m 时, 热力学法的精度也很高。水轮机轴输出功率多是在水轮机主轴法兰盘上安装扭矩应变片在额定转速下测得的转动力矩, 按式 (12) 求得

$$P = M\omega = \Pi n M / 30 \tag{12}$$

式中 M 为水轮机轴所产生的扭矩, N·m; ω 为角速度。当今各型水轮机已达到的最高效率见表。

各型水轮机已达到的最高效率

型式	模型水轮机效率 (%)	原型水轮机效率 (%)	注
轴流式		95.0	
混流式	94	95.0	
冲击式	91	92.2	

水轮机特征效率 包括最高效率、额定效率、加权平均效率。

(1) 水轮机最高效率 (η_{max})。水轮机在其运行范围内具有的最大效率值, 如图 2 中的 A 点。

(2) 水轮机额定效率 (η_n)。水轮机在额定转速、额定水头下发出额定出力时的效率, 如图 2 中的 B 点。

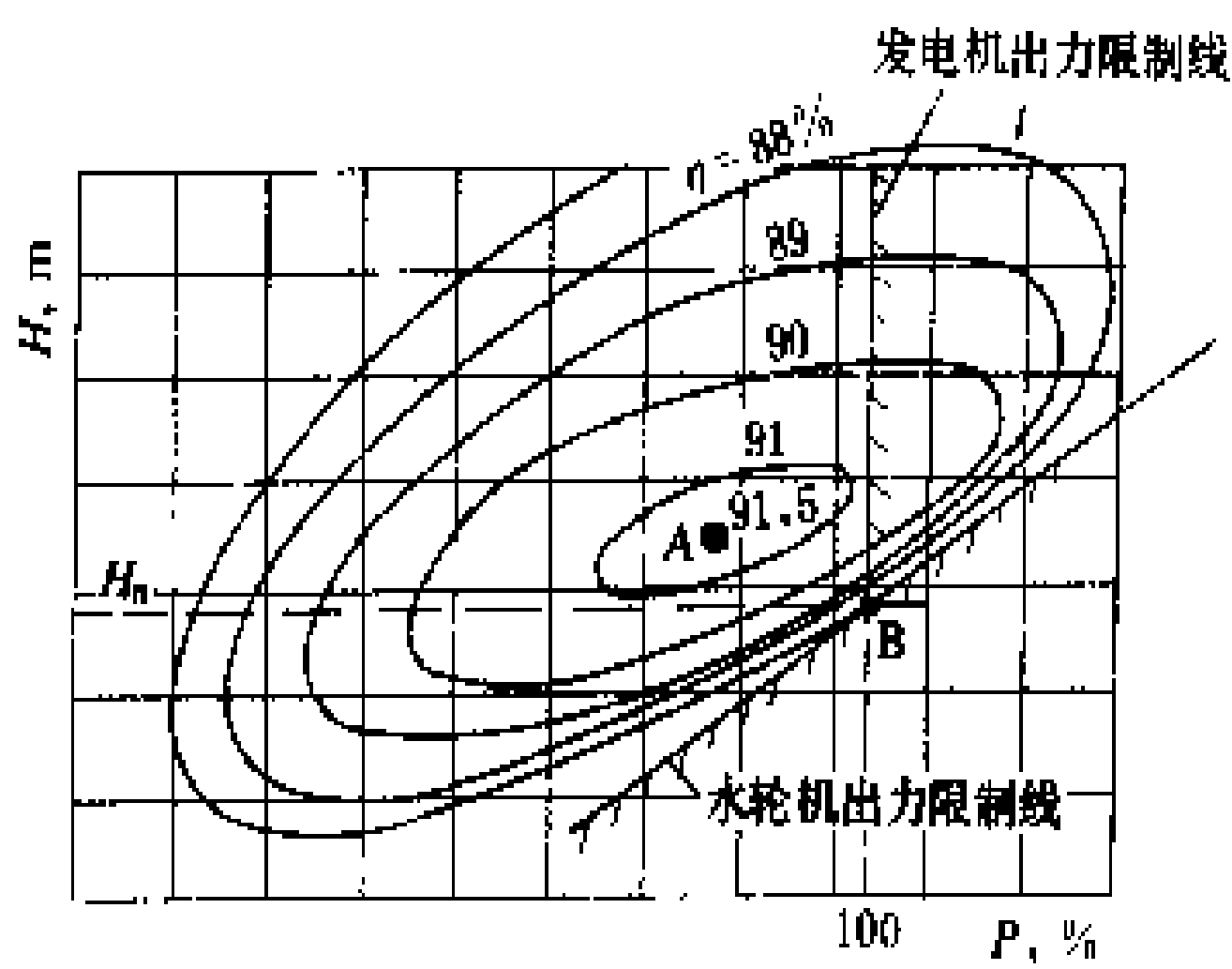


图 2 运转综合特性曲线

(3) 水轮机加权平均效率 (η_w)。水轮机在加权平均水头或几个代表性水头下按照电站运行负荷图计算得出的电能加权平均效率。用来比较不同厂家所供水轮机的能量效益, 其计算公式为

$$\eta_w = \frac{w_1 \eta_1 + w_2 \eta_2 + w_3 \eta_3 + \dots}{\sum w_i} = \frac{\sum w_i \eta_i}{\sum w_i} \tag{13}$$

式中 η_i 是不同水头、不同负荷百分比之下的水轮机效率; w_i 是各相应效率点的电能加权因子。

(青长庚)

shuilunji yunzhuan texing quxian

水轮机运转特性曲线 (performance curve of water turbine)

表示水轮机在各种运行工况下水头、出力、效率和吸出高度等工作参数之间的综合关系。这些特性曲线, 包括等效率线 $\eta=f(H, P)$ 、等吸出高度线 $H_s=f(H, P)$ 和机组的出力限制线。它是用模型水轮机综合特性曲线, 经相似换算和必要的修正, 来确定原型水轮机相应的各种特性, 并绘于以水头 H 为纵坐标、出力 P 为横坐标的图上, 构成水轮机运转特性曲线, 见图 1。水轮机运转特性曲线是水轮机选型设计和安全经济运行的依据。根据运转特性曲线, 可判断所选水轮机的转轮型号、直径、转速等参数是否合理。

图 1 水轮机运转特性曲线

模型水轮机与原型水轮机的参数换算 根据模型水轮机综合特性曲线上的有关参数值按下列公式进行各工况下原型水轮机运行参数的逐点换算。即

$$\eta = \eta_m + \Delta\eta$$

混流式时

$$\Delta\eta = \frac{2}{3} (1 - \eta_m) \left(\frac{D_{1m}}{D_1} \right)^{1/5}$$

轴流式时

$$\Delta\eta = (1 - \eta_m) \left[0.3 + 0.7 \left(\frac{D_{1m}}{D_1} \right)^{1/5} \left(\frac{H_m}{H} \right)^{1/10} \right]$$

$$P=9.81Q'_1D_1^3H^{3/2}\eta$$

$$H_s=10-\frac{\nabla}{900}-K_1\sigma_mH$$

式中 D_1 、 Q'_1 、 H 分别为水轮机转轮公称直径, m; 水轮机单位流量, m^3/s 和水头, m (包括最大水头 H_{\max} 、最小水头 H_{\min} 、加权平均水头 H_s 和设计水头 H_d 等); η_m 、 σ_m 为模型水轮机的效率和汽蚀系数; ∇ 为尾水位的海拔高程, m; $\Delta\eta$ 为考虑比尺效应的原型水轮机效率的修正值; K_1 为汽蚀安全系数, 一般取 $K_1=1.2\sim 1.5$ 。

运转特性曲线的绘制 包括等效率线、等吸出高度线、机组出力限制线等。

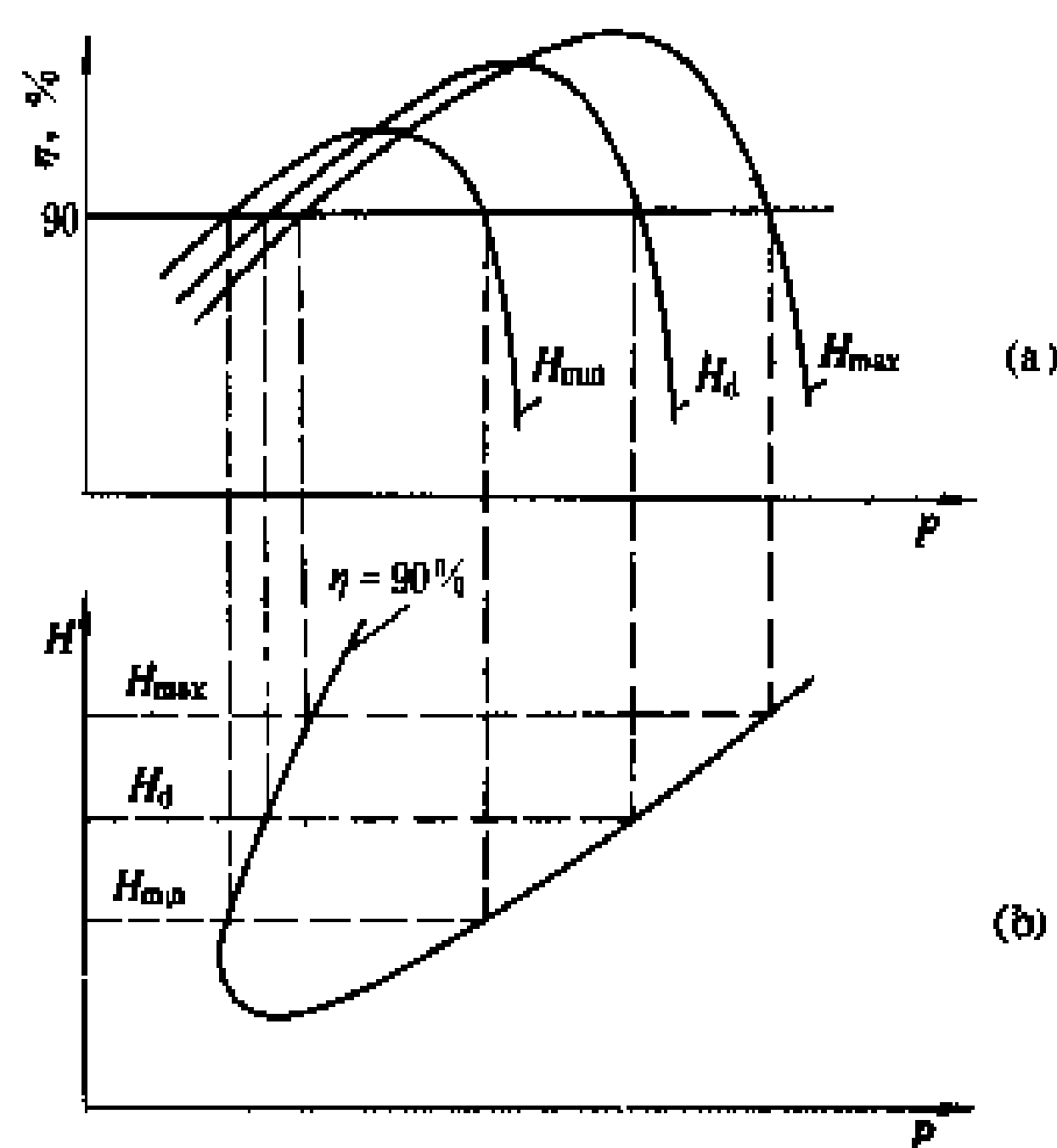


图2 等效率线绘制
(a) 效率特性曲线; (b) 运转特性曲线

(1)等效率线。在水轮机的最小水头至最大水头范围内, 选取 4~5

个水头值, 分别作效率特性线 $\eta=f(P)$, 见图 2(a)。过某效率值如图中 $\eta=90\%$ 作水平线与各效率特性线相交, 得不同水头线上的小负荷点和大负荷点, 将各点连成光滑的曲线即为等效率线, 见图 2(b)。

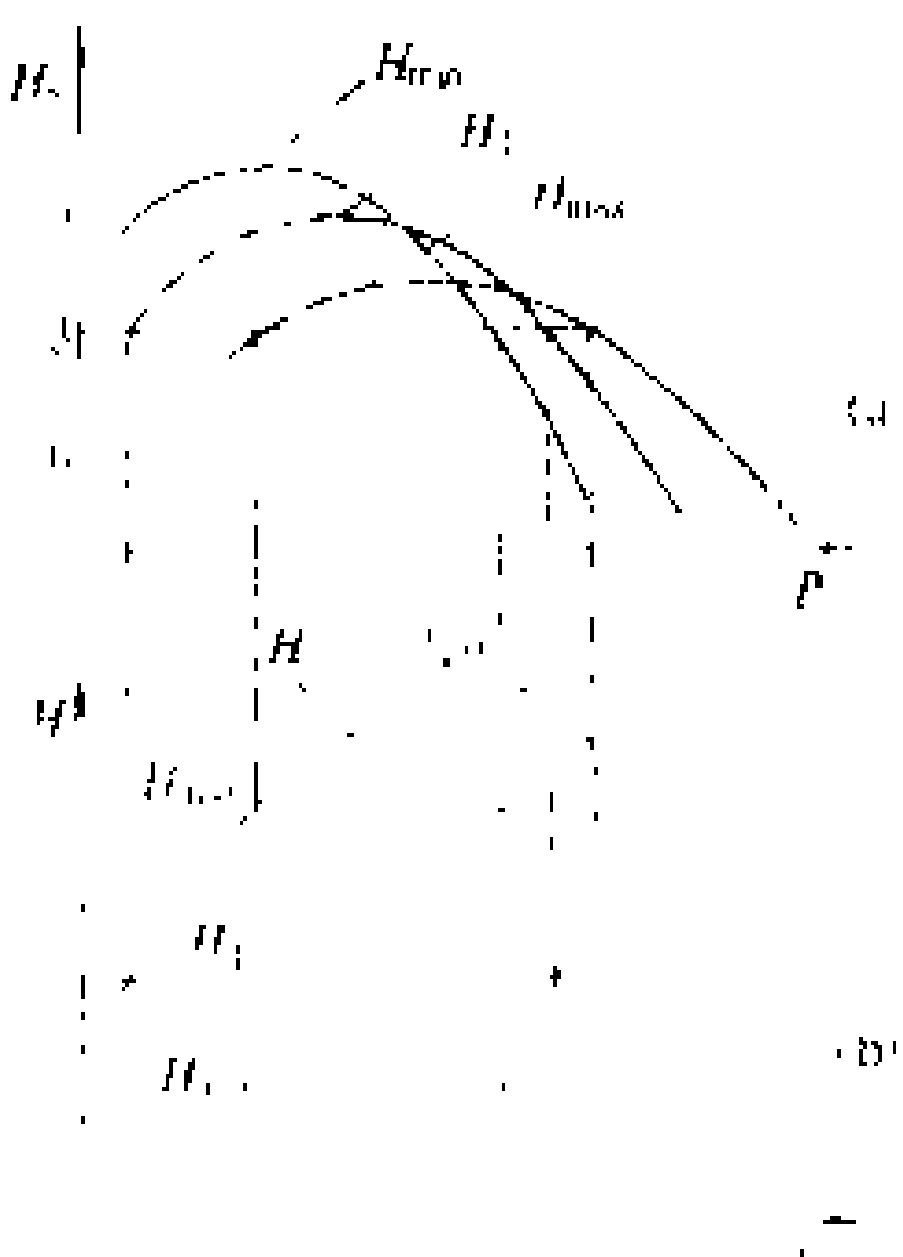


图3 等吸出高度绘制
(a) 吸出高度与出力的关系曲线;
(b) 运转特性曲线

(2) 等吸出高度线。计算出各水头相应的模型单位转速 n'_{1m} ; 然后在模型综合特性曲线上, 查出各相应点的单位流量 Q'_m 和模型汽蚀系数 σ_m , 计算出水轮机出力和 H_s 值, 绘制各种水头下的 H_s

$=f(P)$ 曲线, 如图 3(a)。任取一个 H_s 值作水平线与各 $H_s=f(P)$ 曲线相交, 得各交点的对应值 H 、 P , 点绘在坐标图上并连成光滑曲线, 即为某 H_s 值的等吸出高度线, 如图 3(b)。它表明水轮机在各运行工况时的最大允许吸出高度 (见水轮机吸出高度)。

(3)机组出力限制线。用水轮机模型综合特性曲线上的 5% 出力储备线进行换算。通常选设计水头 H_d 和最小水头 H_{\min} , 连成直线, 见图 4。机组的允许运行范围不但受到最大水头 H_{\max} 和最小水头 H_{\min} 的限制, 同时

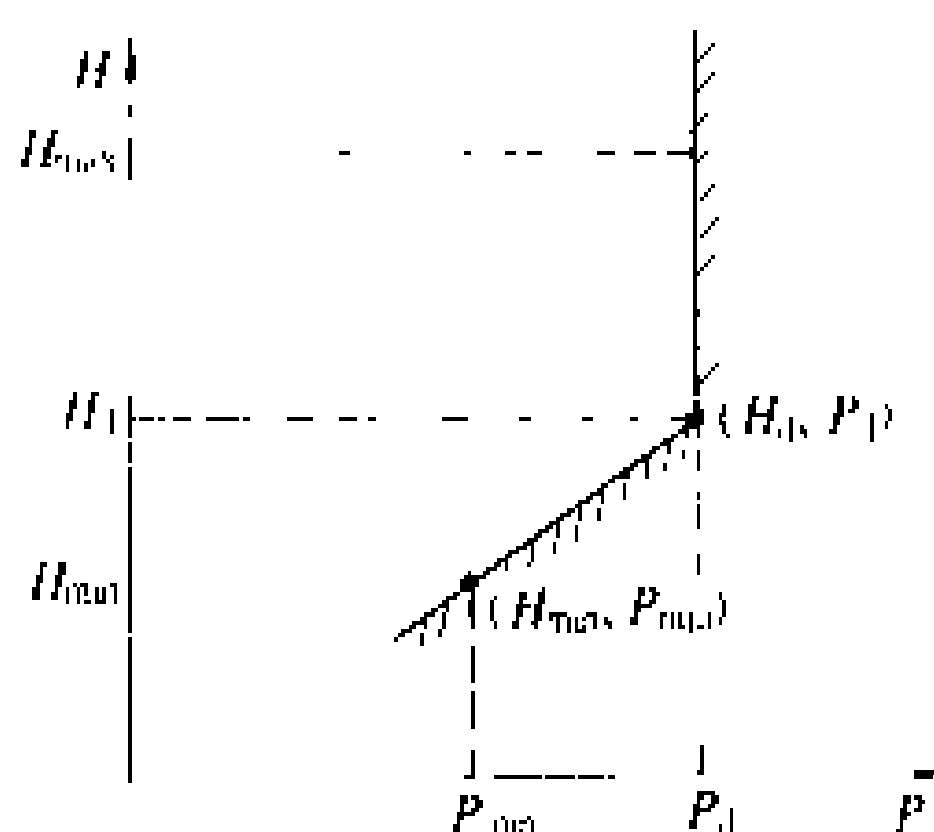


图4 机组出力限制线绘制

当运行水头等于或高于设计水头 H_d 时, 机组出力还受发电机额定容量的限制; 当运行水头小于设计水头 H_d 时, 机组出力也受水轮机最大过水能力的限制。

(刘丽果)

shuilunji zhuzhou

水轮机主轴 (main shaft of water turbine)

把水轮机转轮与水轮发电机转子连成整体, 将转轮产生的机械能传递给发电机的部件。一般主轴制成整段, 一端和水轮机转轮连接, 另一端和发电机轴或转子体连接。有时为了在不拆发电机的情况下能拆出水轮机转轮, 将水轮机主轴分成两段。横轴冲击式水轮机的发电机轴直接和转轮连接, 不存在水轮机主轴。

(1)连接方式。主轴和水轮机转轮及发电机轴的连接依靠刚性法兰, 一般采用销子连轴螺栓紧固, 结构简单可靠, 但没有互换性, 加工较麻烦。也有用销和键传动的, 免去了联轴螺栓孔的铰孔工序, 经少量修整即可互换。近年来已逐渐采用高强度联轴螺栓连接, 靠摩擦传递扭矩, 结构简单, 加工容易, 有互换性。

(2)结构。大中型水轮机主轴一般采用空心结构。混流式水轮机常利用中心孔补气。转桨式水轮机桨片操作油管装在中心孔内。主轴满足扭转振动和横向振动的要求, 其临界转速应等于水轮机最大飞逸转速的 1.1~1.3 倍。

(3)材料。一般用 35、40、45 号碳素钢或 20MnSi 钢整锻而成。也有用上述材料锻造轴身或钢板卷焊成的薄壁轴身用电渣焊和锻造法兰连接。

(吴次光)

shuilunji zonghe texingtu

水轮机综合特性图 (nomography of water

shui

turbine) 水轮机各种性能参数变化关系的曲线簇。包括效率、汽蚀和尾水管压力脉动等特性，它们都随单位流量和单位转速的变化而变化，还随导水叶、

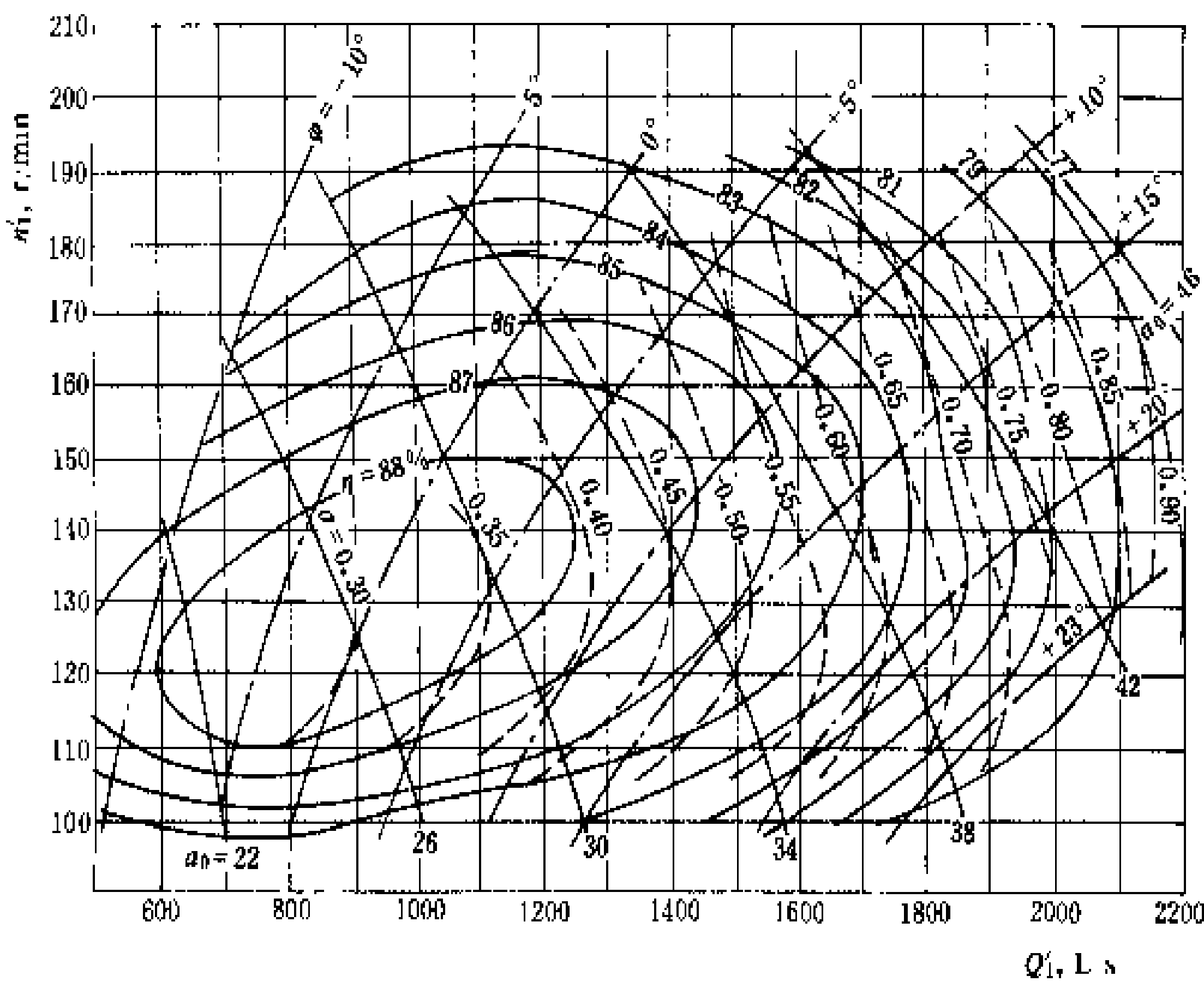


图1 转桨式水轮机综合特性图

针阀开度或转轮桨叶转角变化而变化，是计算各种参数及绘制水轮机运转特性图的基础资料。

模型水轮机综合特性图 通过水轮机模型试验，将测得的各项参数值换算成水头为 1m 和转轮直径为

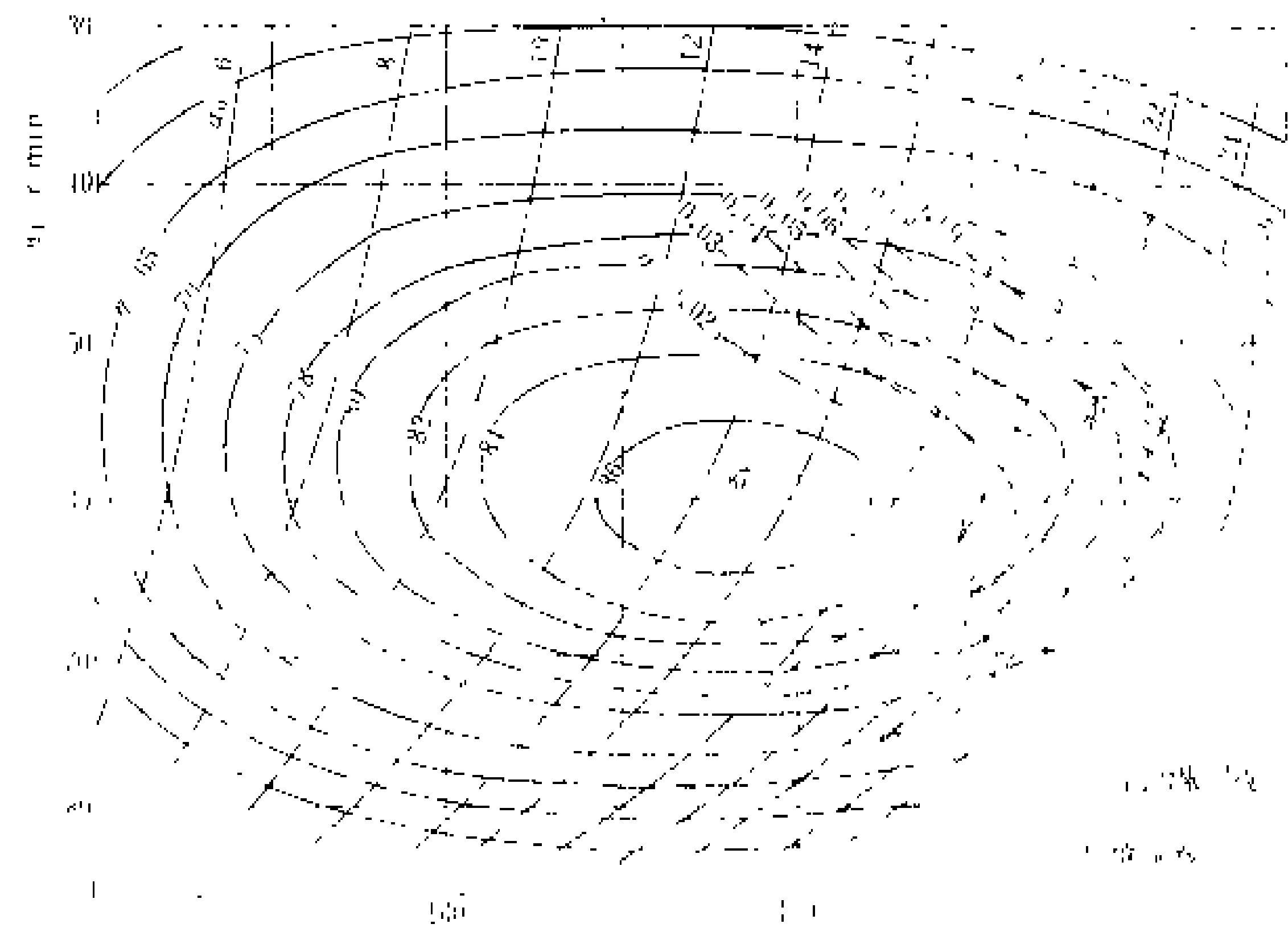


图2 混流式水轮机综合特性图

1 m 的相应数值，以等效率 η 、等汽蚀系数 σ 、等压力脉动值 A 、等导水叶开度 α_0 、5% 出力限制（混流式和轴流定桨式水轮机）、等桨叶转角 φ （轴流转桨式水轮机）等等值线的形式，反映在以单位转速 n'_1 为纵坐

标、以单位流量 Q'_1 为横坐标的特性图上，转桨式和混流式水轮机综合特性分别见图 1、图 2。

混流和轴流定桨式水轮机的出力有一个 100% 出力限制线。过该线后，虽增大流量，

出力却因效率下降而降低。为了保证水轮机的出力，而人为地将 100% 出力限制线左移，划出具有 5% 的出力裕量线，即图中的 95% 出力限制线。

压力脉动 反击式水轮机在运行中由于水力原因，在尾水管内引起的压力脉动使水轮机不能稳定运行且随着机组的大型化而更加突出。根据经验统计，压力脉动允许值 \bar{A} 与水轮机的工作水头有关，300 m 以上水头的 $\bar{A} \approx 3\%$ ，百米以下水头的 $\bar{A} \approx 5\% \sim 7\%$ ，超过上述值时，机组运行可能不稳定，超过太多时将使机组不能运行。

(青长庚)

shuoneng jingji

水能经济 (hydropower economics) 研

究水能开发、转换、传输和分配中经济分析与评价的理

论和方法。其目的在于经济合理地利用水能。水力发电是现代水能开发的普遍形式，因而水能经济的主要内容就是分析研究水电站规划、设计和运行管理过程中的费用和效益（见水电站效益），以寻求综合经济效益最优的方案。一般，先拟定若干满足要求、技术上可行的方案，在费用、效益分析的基础上，对各方案进行水电站经济评价，经综合分析后决策。比较严格的做法是根据现代数学的规划理论，构造模型，应用优化的方法，在满足约束条件的前提下，寻找到单目标或多目标的最优方案（见水能利用优化）。在水能经济研究中，要充分注意水能开发利用的特点。

水能经济的特点 水能经济主要有如下几个特点。

(1) 水力发电同时承担一次能源开发和二次能源

转换的双重任务。煤电、油电、核电与水电进行项目技术经济分析和评价时,方案费用的计算,应包括一次能源和二次能源开发、转换、传输和消费各环节的费用,尤其不能忽略环境保护的费用。水电站建成后不需要消耗燃料,生产成本低(见水电站生产成本)。

(2)水电站的水库常具有防洪、灌溉、航运、供水、养殖和旅游等综合利用效益。对于有综合利用效益的水电站,在经济评价中要计及其效益,或进行费用的合理分摊(见综合利用工程费用分摊)。

(3)在水电站生产运行过程中,通过其上游或下游梯级电站的投产,或通过跨流域电力补偿调节、电力系统优化调度等,增加水电站群的保证出力和年发电量。由于大型水电站投入,为电力系统带来联网的错峰与减少备用容量的效益。在经济评价时,应计及上述为电力系统所增加的效益及相应增加的输电费用(见水库群补偿径流调节)。

(4)由于水电站服务期较长可达百年,故在进行水电站经济分析和水电站经济评价时,计算期应较长,一般采用50年。

研究内容 分为政策研究、宏观规划、水电站项目经济研究和水电站经济运行四个方面。

(1)政策研究。属于宏观决策性质,如水电建设和管理体制、经济政策、电价、建设资金筹集和使用等。

(2)宏观规划。从能源开发、电力建设和水资源开发利用的总体上研究水电在电力系统中的合理比重、水能开发的合理布局和水电站的建设时序。具体内容包括国民经济发展对能源和电力需求预测、水电比重较大的电力系统发展规划(含电力系统水电合理比重、水火电站合理的开发时序及水电站合理供电范围)、河流综合利用规划、水电开发方式及梯级开发规划和地区水电发展规划。

(3)项目经济研究。含项目经济评价、水电站特征值(如正常蓄水位、装机容量及机组机型)优选和水电站环境影响经济评价。在水能经济研究中,常用“有和无”对比的方法进行项目的经济评价。即在同等满足系统供电数量、质量和可靠性的条件下,按兴建和不兴建某一项目两种情况进行比较,以全系统总现值费用最小确定兴建该项目的合理性。

(4)水电站经济运行。包括水、火电站在电力系统中的最优运行方式和水电站水库(群)优化调度等。

经济评价 包括经济分析和财务分析两大内容。前者从国家或社会角度,考虑水电站项目的经济可行性,并常用影子价格和影子汇率计算各项费用与效益的真实价值;后者从电力企业或工程角度,分析项目的财务可行性,按现行价格、税收制度和利率,计算项目

的费用和效益以及投资偿还年限等。(见水电站经济分析和水电站财务分析)

发展和展望 20世纪30年代,由于水电的大量建设,水能经济开始兴起。当时西方国家广泛应用考虑资金时间价值的经济分析原理和方法,如美国的E.L.格兰特(E.L. Grant)于1930年所著的《工程经济原理》。西方国家在水能经济方面,应用这种原理和方法,以净效益最大或发电成本最低的方法进行经济评价,但往往局限于单个工程的评价,以后随着系统的发展,才逐步走向完善。苏联在30年代提出静态的不考虑资金时间价值的“抵偿年限”法,60年代以后,逐步改用考虑时间因素,对抵偿年限法,作了一些修正。中国自50年代起,沿用苏联的原则和方法,70年代以后,改用考虑时间因素的原则和方法,并结合国情,逐步加以完善。

中国水能资源丰富,但开发利用程度远低于发达国家,在今后水电站建设中,水能经济有大量课题需要深入研究,主要是:①结合中国实际,提出水能经济的分析理论、评价准则和方法。②提出在经济评价中正确体现照顾国家、地方、企业和集体各方面的利益的原则。③水电建设资金筹集、电价政策、水库经济和水电建设管理体制。

(杨德功)

shu neng li yong xue

水能利用学 (science of hydropower utilization)

研究经济合理地开发和利用水体的位能和动能发电的学科,又称水能学。它是一门技术与经济相结合的边缘学科。其基础是水文学、水力发电工程学、动能经济学、水利工程学、工程经济学和系统工程学等,并与水资源、电力和能源的开发、电力系统、社会科学及生态环境学等方面有紧密的联系。

主要研究问题 包括水资源系统、一次能源系统及电力系统中与水能的合理利用有关的,从宏观到微观的一系列技术经济问题。主要有:水能资源普查,河流梯级开发和综合利用规划,地区(或跨地区)一次能源和电源规划,地区(或跨地区)水电发展规划,水电站项目经济可行性评价,电站主要特征值(如正常蓄水位、装机容量等)优选,大型水电站合理供电范围,水电站的运行、调度方案等。

主要内容 包括四项相互关联的内容:①集中自然界分散的水能的方式(见水力发电)。②水库运行决策。利用水库进行径流调节,制定水库的运行方式,提高水能利用的数量和质量(见径流调节)。③水电站运行决策。研究水电站在电力系统中的任务和运行方式,进行电力系统的电力电量平衡,核定水电站的容量和

电量效益及系统中其他电站的容量和燃料消耗量（见电力电量平衡）。④水电站投资决策。当水电站效益的取得，以增加其投资为代价时，对不同方案进行经济评价（见水电站经济评价），作为选定方案的经济依据（见水能经济）。

基本原则 研究水能利用学要遵循下述基本原则。

(1) 以系统工程的原则研究问题。以全系统（含电力系统的一次、二次能源系统和水资源系统）整体最优为出发点研究问题和选择方案。

(2) 运行决策（含水库运行决策和电站运行决策）。在不增加水电站资金投入的条件下，将系统中的水库群或水、火电站群作为一个整体，研究水库群或水、火电站群总体和各自的优化运行方式，使系统发电效益达到最大。

(3) 在进行投资决策时，投资效益除本电站的效益外，还要计及由于该资金投入带来的系统附加效益，如增加水电站群的保证出力和年发电量等“群”的增益。应考虑水电站在整个服务期中效益和费用随时间推移而引起的变化。

(4) 在进行综合利用项目的投资决策时，必须计入综合利用的效益，或进行综合利用工程费用分摊。

研究方法 可分常规法和优化法两类。

(1) 常规法。方案选择一般用对比法，即根据工程经验列举若干个可相互替代的方案，并对每一个方案进行运行决策，相应核定水电站（群）的发电效益，以各方案满足相同数量、质量的电力、电量需求为前提，确定逐年系统内其他电站的规模及相应燃料消耗量，据以计算全系统逐年费用，并折算成总现值费用。根据现值费用最小的原则并结合其他社会及技术因素以选定方案。

这种方法应用广泛，但也存在一些问题：①在进行水库运行决策时，常以保证出力及发电量最大面不是以系统费用最小为决策目标。②水库运行决策与电站运行决策分开进行，难保两者的最优性。③对各方案未进行本方案结构的优化，可能影响方案间评价的结果。④可能漏掉最优方案。

(2) 优化法。根据工程问题，建立优化模型，将与水能利用有关的各种因素作为一个系统进行优化。从所有可能的方案中进行筛选，能够达到整系统优化的目的。因水能利用的优化是涉及面很广的、非线性的时空优化问题，模型是很复杂的。需根据不同的问题和情况建立合适的模型。（见水能利用优化）

简史 早期，人们以直接的方式利用水能，即以水车、水磨等将水能直接变为机械能加以利用。19 世纪末叶，随着机械、电气和输电技术的发展，使水力发电

逐渐成为水能利用的主要形式。西方国家从 20 世纪 30 年代起，开始系统研究水能利用。初期，只限于研究单个水电站的开发，主要涉及开发形式、河川径流特性、水库径流调节方法及工程经济评价。随着水能资源的大量开发，人们开始进行河流梯级开发和水资源综合利用等问题的研究。随着电力系统的形成和发展，逐步开展水电站在电力系统中的作用及其与火电厂的联合运行方式的研究。西方工程经济的原理和方法逐渐与水电工程相结合，经济评价考虑以复利形式计算的资金的时间价值，方案选择以现值费用最小为原则，并相当重视财务的评价。50 年代以后，由于系统工程和优化方法的发展以及电子计算机的广泛应用，与经济评价结合，水能利用作为一门学科，得到很快发展和提高。以水电站群的优化为标志，从水资源系统和电力系统最优化出发进行的水能利用研究，达到了新的水平。

苏联的水能利用研究也始于 30 年代。在径流调节方面与西方各国相似；电力电量平衡多用确定型；在经济评价方面以“设计水平年”为确定水电站规模及效益的年份，不考虑水电效益随时间的变化，以“抵偿年限”或“计算支出”为经济评价标准。70 年代以后，逐步应用考虑资金时间价值的理论和方法。

中国在 1949 年以前，采用西方的方法进行水电开发的经济评价，50 年代始，应用苏联的准则和方法。70 年代初期，开始在水能利用研究和规划设计中应用电子计算机，70 年代后期引用西方考虑资金时间价值的经济理论、系统工程理论和优化方法。80 年代以来，在地区及跨地区一次能源规划及电力系统电源规划、地区及跨地区水电发展规划、水电站（群）径流补偿调节计算及水电站（群）水库运行调度等方面，有较大的进展。

（伍宏中）

shuinnng liyong youhua

水能利用优化 (optimization in hydropower utilization) 应用系统工程思想和系统分析优化方法，研究水能利用问题，以达到最合理地利用水能资源的理论和方法。

研究任务 其内容涉及从一次能源开发、二次能源转换、电力传输及分配各环节的技术经济问题。包括：①电力系统能源的构成。②电力系统电源选择和水电站的开发时序。③水电开发方式和开发方案。④水电站主要特征值优选（如正常蓄水位、装机容量和装机程序）。⑤水电站水库（群）的运行方式。⑥水电站在电力系统中的运行方式等问题。这些问题涉及空间和时间相互影响的两个范畴，并且很多关系都是非线性的，因此水能利用优化是一个非常复杂的问题。用常规方

法难以求得满意的结果,故需要应用系统工程思想和系统分析的优化方法。

优化算法 经常采用的算法有六类。由于水电规划问题的复杂性,对一个规划问题的求解,往往需要根据问题的性质,应用多种数学规划的方法。

动态规划 多阶段决策的数学方法。创始人 R. 贝尔曼 (R. Bellman) 阐述动态规划 (Dynamic Programming, DP) 最优性原理:“一个最优策略有这样的特性,不论初始状态和初始决策如何,相对于一个决策所形成的状态来说,余下的决策必定构成一个最优策略”。其特点是将决策变量和状态离散化,用递推法进行逐阶段决策,直到最后一个阶段,形成最优决策。该法适宜于多阶段决策的优化问题,也可将多维的问题,化为一维的多阶段问题来处理。其优点是,思路简单明了,易于构模,且能解决复杂的非线性问题。缺点是,没有经典的解法,且当规划规模过大时,常因决策变量过多,形成“维数灾”,而难于求解。为了解决“维数灾”的问题,又发展了多种改进的动态规划方法,如状态增量动态规划 (State Incremental Dynamic Programming, SIDP) 和离散微分动态规划 (Discrete Differential Dynamic Programming, DDDP) 等。动态规划目前广泛应用于水库优化调度 (见水电站水库优化调度)。也有人试图用以解决水电站群特征值优选及电力系统电源优化问题。逐步优化算法 (Progressive Optimal Algorithm, POA) 及改进逐步优化算法 (Improved Progressive Optimal Algorithm, IPOA), 是动态规划的一种扩展,它是将 n 个阶段决策问题,化为 n 个一阶段的子问题来求解,即在前一阶段及下一阶段的状态均为已知的情况下求面临阶段决策,逐步循环迭代,求最优解的方法。其子问题的优化,可用各种优化算法。

线性规划 (Linear Programming, LP) 其目标函数和约束方程都是线性的数学规划方法。常用改进单纯形法求解。这种方法是对有限的角点进行迭代,寻求最优解。此法很成熟,广泛应用于经济模型、系统水电站运行模拟 (即系统电力电量平衡) 等。有些非线性的问题,如水电站 (群) 径流调节等,也可用逐次线性化的办法用线性规划来求解。缺点是决策变量只限于连续变量。

非线性规划 (Non Linear Programming, NLP) 它是目标函数和约束方程中至少有一个是非线性的数学规划方法。常用各种搜索方法来求解无约束非线性规划问题。对于有约束非线性规划问题,用罚函数法,将有约束问题化为无约束问题,然后用搜索法来寻优。适宜于解非线性的问题,如水电站 (群) 径流调节。求解很复杂,且要求问题是“凸性” (即“单峰特性”) 的,

否则可能找不到整体最优解。为了保证找到整体最优解,可能还要进行量纲的变换及应用其他方法求初始解,作为搜索的起点。

混合整数线性规划 (Mixed Integer Linear Programming, MILP) 它是含整型及连续变量的、目标函数和约束方程均是线性的数学规划方法。特点是利用整型变量,将非线性规划的问题,化为线性问题来解。整型变量常用来描述研究对象的状态,如用 0-1 变量描述电站是否投产 (0 为未投产,1 为已投产),或用整型变量描述电站的装机台数或输电线的回路数等。常用“分枝定界”法求解,即对每一个整型变量进行搜索,每次搜索均要进行一次线性规划,根据搜索结果进行“剪枝” (即剔除被淘汰的整型变量),搜索完毕即得最优解。该法可用于解河流水电开发规划、电力系统电源优化和地区水电发展规划。缺点是计算量特别大,若整型变量为 n 个 0-1 变量时,则其计算工作量与 2^n 成正比,故常需应用其他优化技巧加速“剪枝”。

纯整数规划 (Integer Programming, IP) 它是变量均为整数的线性的数学规划方法。常用隐枚举法求解,可用于电力系统机组检修容量平衡,但计算工作量很大。

其他算法 ①大系统分解协调法。是将大规模的问题化为多个较小的子问题来求解,并用耦合变量对各子问题进行协调,以求得大规模问题的 (近似) 最优解。②网络流规划。是线性规划的一种,可求解较特殊的线性规划问题。③多目标规划,多用于求解综合利用工程的问题。其他还有模糊数学方法等。

数学规划软件包

为了求解各种数学规划问题,需要有强功能的数学规划软件包。软件包一般拥有或多或少的各种规划问题的解题器,用户用各种规划方法建立的模型,要应用数学规划软件包来求解。常见的数学规划软件包有 GAMS 及由解题器 SCICONIC 和 MGG 组成的软件包。前者拥有解题器 BDMLP、CONOPT、MINOS5 和 ZOOM,可解线性规划、非线性规划、混合整数线性规划和混合整数非线性规划;后者可解线性规划及混合整数线性规划。

优化模型 一般可分整体优化模型和局部优化模型两种,前者对问题进行全面的优化,后者是前者进行局部优化的子模型。

整体优化模型 该类模型用于:①电力系统能源的构成优化;②电力系统电源优选;③水电站开发时序优选 (即水电发展规划);④水电开发方式和开发方案优选;⑤水电站特征值优选。其中第①~③项属于能源的宏观规划,第④项为水资源的优化,第⑤项为微观规划。它们是相互联系又各有侧重的统一体,属于投资优



化决策。目标函数为全系统(电力系统和水资源系统)现值费用最小。能源系统应包括一次能源生产,二次能源转换、传输和消费各环节。水资源系统应包括水资源各主要用户。约束条件应包括能源及水资源需求约束、资源约束、电站及水库运行约束三方面。但在不同的阶段对不同的优化对象,有所侧重。

近二三十年来,世界各国构造了许多电力规划模型,如国际原子能机构的 WASP-Ⅱ 模型、法国电力公司(EDF)的 MNI/POP 和 PCHAIN 模型等。大部分模型均能较充分地反映火电厂及电力系统的特性,有的还考虑了负荷的随机性、失负荷概率和系统的可靠性,按随机型进行电力系统运行模拟。但对水电的优化,大都考虑得很粗略,尚不能较好地解决有关水电站特别是水电站群的规划问题,如 WASP-Ⅱ 模型对水电站的投产,是预先确定的;MNI/POP 和 PCHAIN 模型则以水电站的费用小于或等于系统未供电的边际费用的原则,作为水电站投产决策的依据,只适用于容量较小的水电站。加拿大的 CAPRI 模型为混合整数规划模型,可进行水电规划,但对电力系统描述比较粗略,是一个财务模型。

70 年代末期以来,中国进行整体优化模型的研制工作,取得了较大的进展。研制出一些模型,这些模型都是基于确定型的电力电量平衡,主要有:①混合整数规划和线性规划结合的模型。该模型兼有自动寻优及对离散的方案进行评价的功能,含系统电源优化、水电站装机容量和动力煤矿规模的优化、分系统间的功率交换和主网架的优化等。其特点是,水电站水库群的径流调节和系统电力电量平衡是与上述各项决策的优化同时完成的,较好地反映了水电的特性,较好地解决了水电规划的复杂问题,已应用于中国水电中长期发展战略的大型规划。②动态规划模型。含径流调节和电力电量平衡两个子模型(子模型的解法各异),并以动态规划进行整体决策。模型简单易懂,但存在尚待解决的“维数灾”和“后效性”(即先建坝后装机)的问题。③其他模型,如类梯度筛选法模型等。

局部模型 该类模型一般为系统模拟模型,是在不增加投资,或投资已定的情况下,进行运行模拟,寻求运行费用最小或发电效益最大的运行决策方案。主要有电力电量平衡模型和水电站水库群补偿径流调节模型两种。

(1) 电力电量平衡(电站运行模拟)模型。该类模型都是线性规划的模型,分两种类型:①确定型,即系统负荷及备用容量均为已定值,系统的电源必须严格满足系统容量和电量的要求。②随机型,即系统负荷和各电站运行机组数,均是随机的,当系统容量和电量不能满足时,应考虑停电损失,费用均为数学期望值。

模型的目标函数一般为现值费用最小。对于火电厂的煤耗费用,有的按线性处理,有的按非线性处理。

模型的约束条件主要有:①能量和容量(确定型模型含备用容量)平衡约束。②电站运行工况约束,含水电站预想出力、火电厂技术最小出力、抽水蓄能电站发电和抽水工况约束、电站调峰能力约束等。③水电站综合利用约束。④输电线输电能力约束。

为减少非零元素,常将离散后的系数日(或周)负荷按大小次序排成日(或周)负荷历时曲线,用 Z 替代法,即将系统负荷和电站的出力,处理成相邻时段间的增量值。

系统电站机组的最优检修计划,是一个整数规划的问题,由于整数规划解题规模的限制,对大系统来说是很困难的。

(2) 水电站水库群补偿径流调节模型。它是一个非线性规划的问题,其目标函数和部分约束条件(如出力、库容与库水位关系、泄流量与尾水位关系及发电流量与水头损失关系)为非线性的。

目标函数有两种处理方式:①当有上层总体优化模型传送边际费用信息时,宜用最小费用或最大效益。②无边际费用信息时,常在总保证出力极大化的基础上,寻求发电量极大化。

约束条件主要包括:①水量平衡方程(含上游库调节的影响)。②水库状态及其连续方程。③能量平衡方程。④梯级水位重叠约束,即上游梯级尾水位不低于其下游梯级水库的运行水位。⑤水库运行约束,即与正常蓄水位和死水位相应的最大和最小库容约束。⑥电站约束,含装机容量和预想出力约束。⑦系统约束,含电站最小出力和跨流域电力补偿调节输电能力约束。⑧综合利用约束,防洪、泥沙及库内航运常在一年内的各时段,以最大或(和)最小库容为约束;灌溉、给水及下游航运,在一年内各时段以最小流量(或换算为最小出力)为约束。⑦~⑧为界约束,在计算中以变量的界进行处理,不占方程数。

模型可包括:动态规划模型、非线性规划模型、线性规划模型和逐步优化法四类。①动态规划模型。广泛用于单库的优化径流调节(见水电站水库优化调度)。库群的径流调节有一些特殊的处理,将多库问题划为两库的问题来求解。如库偶法,是应用聚合分解的原理,把 n 个水库的联合运行问题,分解为 $n-1$ 对库偶的两库联合运行的子问题来解。目标都是在满足与设计保证率相应的保证出力的前提下,求发电量最大。②非线性规划模型。将库容曲线和尾水位-流量关系曲线进行曲线拟合,求得非线性表达式和相应的非线性约束方程,目标函数为非线性的。用混合罚函数和寻优方法求解。为了有把握求得整体最优解,常用其他方法求

初始解。③线性规划模型。常用函数变换的办法,将非线性的目标函数线性化,并用多直线段近似库容曲线和尾水位-流量关系曲线。用多次解线性规划的迭代法,逼近非线性的最优解。④逐步优化法。将 n 时(阶)段优化问题,分解成 n 个1时(阶)段的子问题,逐时(阶)段对水库状态进行迭代求解。每个子问题是在前时(阶)段及下时(阶)段状态已定的情况下,优化面临时(阶)段的状态。子问题间以系统状态相联系,大大简化了计算。从一个初始状态起,逐次对多时(阶)段的子问题进行优化,周而复始进行迭代计算。当前一轮各时(阶)段的状态与后一轮各对应时(阶)段的状态充分接近时,即为最优解。各时(阶)段子问题的优化,可应用各种优化算法。其收敛速率决定于初始状态。

简史 早期,主要应用古典的优化技术,进行静态的优化,如拉格朗日乘数法应用于水电站群的装机容量的分配。1957年美国的J.D.C.李特尔(J.D.C. Little)应用动态规划方法进行大古力水电站水库调度,是现代优化方法在水能利用的开始。1964年P.马西(P. Massee)和R.吉布拉特(R. Gibrat)提出线性规划模型,法国电力公司用其进行3个5年的电力规划。1969年W.S.布彻(W.S. Butcher)等人提出兴建水利工程的初级动态规划决策模型,以工程建设投资现值最小为目标函数,只适用于单一目标的单一水库,算法较落后,且可能遗漏最优解。1971年,T.L.莫林(T.L. Molin)和A.M.厄索比(A.M. Esogbue)改进了布切儿的模型,采用“嵌入状态空间”的新动态规划算法,大大减少了计算工作量,且不致漏掉最优解。1973年D.艾林考特(D. Erlenkotter)提出整数动态规划的模型,以0,1变量表示工程未修建和已修建。1974年,L.G.米滕(L.G. Mitten)和C.A.曹(C.A. Tsou)也提出相似的模型、用隐枚举法求解,并改进了算法。1974年L.贝克尔(L. Becker)和W.W-G.叶(W.W-G. Yeh)提出动态规划与线性规划结合的模型,解决水利工程开发的次序、时间和规模问题。1973年,J.凯珀(J. Kuiper)和L.奥托拉诺(L. Ortolano)提出解水、火电联合排序的动态规划整体模拟模型,对不同工程方案,进行运行的模拟,从而选出其中最优的方案。70年代世界银行的D.安德森(D. Anderson)等提出Z替代法,显著地减少了线性规划的方程数量,使得大型规划易于实现。70年代以后各类电力规划模型相继研制成功,但均未能满意地解决含水电站群的电源规划。

中国从50年代末起研究水库优化运行。70年代末期开始对红水河、长江上中游、澜沧江和乌江优化开发的研究,提出了一些模型,其中较有代表性的有

IRELP/I及其提高型SIRELP混合整数规划与线性规划模型、大系统分解协调的线性规划模型DECIRELP、GESP线性规划模型和其他动态规划模型。混合整数规划和线性规划模型,已达到实用阶段,但对考虑系统可靠性问题,尚待进一步研究解决。

参考书目

李德等,运筹学,北京:清华大学出版社,1982

(伍宏中)

shuinneng ziyuan

水能资源 (hydropower resources) 蕴藏

于河川和海洋水体中的位能和动能。在一定技术、经济条件下,水能资源的一部分可以开发利用。按资源开发可能性的程度,水能资源分3级统计,即:理论蕴藏量、技术可开发资源和经济可开发资源。根据当前技术、经济水平,可开发资源主要是河川水能资源,潮汐能资源占小部分,波浪能利用尚处于试验阶段。水能资源属于再生能源,一般按多年平均年发电量进行统计。

水能资源统计分级 可分为3级:

(1)理论蕴藏量。按理论公式计算的河川水体蕴有的位能。计算理论蕴藏量的公式中,均假定通过河流的水量和计算河段的水位差全被利用,并假定能量转换效率为1。世界各国在计算精度上也不尽相同。如有的按地面径流量和高差计算;有的则按降水量和地面高差计算。中国把一条河流分成河段,按通过河段的多年平均年径流量及其上下游两端的水位差,用式(1)计算河段的理论蕴藏量。式(2)是理论蕴藏量用功率表示的形式。

$$E = 0.00272WH \quad (1)$$

$$P = \frac{E}{8760} = 9.81QH \quad (2)$$

式中 E 为按多年平均年发电量计算的理论蕴藏量, $\text{kW} \cdot \text{h/a}$; W 为河段两端多年平均年径流量的均值, m^3 ; H 为河段两端水位的高程差, m ; P 为按平均功率表示的理论蕴藏量, kW ; Q 为通过河段的多年平均流量, m^3/s 。

一条河流、一个水系或一个地区的水能资源理论蕴藏量是其范围内各河段理论蕴藏量的总和。

(2)技术可开发资源。按当前技术水平可开发利用的水能资源。根据各河流的水文、地形、地质、水库淹没损失等条件,经初步规划拟定可能开发的水电站,统计这些水电站的装机容量和多年平均年发电量,称为技术可开发资源。按技术可开发资源统计的多年平均年发电量比理论蕴藏量少得多。差别在于,计算技术可开发资源时,有3点不同于计算理论蕴藏量,即:①不包括不宜开发河段的资源;②对可开发河段,考虑了因

水库调节能力的限制、库水位变动和引水系统输水过程中的损失等因素,致使部分水量和水头没被利用;③

47.9%。

(2)中国河川水能资源。中国在20世纪50年代统

计过1600条河流的理论蕴藏量,为5.4万亿kW·h/a,未统计可开发资源。在70年代又做了普查,统计了单河理论蕴藏量1万kW以上的河流3019条,总理论蕴藏量为5.7万亿kW·h/a,加上部分较小河流后合计为5.92万亿kW·h/a。70年代普查时没有按技术和经济可开发资源分别统计,但按6种类别进行了分类统计。6种类别是:已建水电站、在建水电站、一类资源、二类资源、三类资源、四类资源。一类资源指研究深度已达可行性研究及以上的水电站;二类资源指经过河流规划被选为宜先开发的水电站;三类资源指经过现场查勘工作后拟定的水

电站;四类资源指仅据地形图估算过工程量和能量的水电站。单站装机500kW及以上的可开发水电站共11000余座,总装机容量37853万kW,多年平均年发电量19233亿kW·h。其中三类和四类资源约占60%。全国各大区和各水系的理论蕴藏量和技术可开发资源的分布见表3和表4。经济可开发资源的统计工作正在进行,据1993年的初步估算为,装机容量29000万kW,多年平均年发电量12600亿kW·h。

中国河川水能资源的特点有:①资源量大,占世界首位。②分布很不均匀,大部集中在西南地区,其次在中南地区,经济发达的东部沿海地区的水能资源较少。与中国煤炭资源偏重在北部,形成北煤南水的格局。③大型水电站的比重很大,单站规模大于200万kW的水电站资源量占50%。已于1993年7月进入施工准备阶段的三峡水利枢纽的装机容量为1820万kW,多年平均年发电量840亿kW·h。位于雅鲁藏布江的墨脱水电站,经查勘研究,其装机容量为4380万kW,多年平均年发电量2630亿kW·h。

潮汐能资源 据世界能源会议1992年《能源资源调查》估计,全世界海洋潮汐能达22万亿kW·h/a,其中经济可开发的仅为2000亿kW·h/a,现已开发的仅6亿kW·h/a。

中国在80年代进行过潮汐能资源普查,统计技术可开发资源的装机容量为2157.5万kW,多年平均年发电量618.7亿kW·h。分布见表5。

表1 世界各大洲河川水能资源分布表

地 区	理论蕴藏量 (亿 kW·h/a)(%)	技术可开发资源 (亿 kW·h/a)(%)	经济可开发资源 (亿 kW·h/a)(%)
全世界	350000 100.0	150000 100.0	93500 100.0
亚 洲	120000	51000	24500
拉 美	95000	40000	30000
非 洲	35000	16000	7000
发展中国家合计	250000 71.4	107000 71.3	61500 65.8
苏 联	39420	14200	10950
欧 洲	24400	12000	8100
北 美	23000	12500	10000
日 本	7180	1300	1150
大洋洲	6000	3000	1800
发达国家合计	100000 28.6	43000 28.7	32000 34.2

注:1.表中亚洲不包括日本和苏联亚洲部分,欧洲不包括苏联,北美包括加拿大和美国。
2.主要资料来源:《国际水力发电与坝工建设1993年手册》。

采用实际可能的能量转换效率, $\eta < 1.0$ 。由于技术可开发资源随技术水平和社会、环境等条件的发展而变化,故技术可开发资源的数量也随时间发展而有所变化。

(3)经济可开发资源。根据地区经济发展要求,经与其他能源发电分析比较后,对认为经济上有利的可开发水电站,按其装机容量和多年平均年发电量进行统计。经济可开发水电站是从技术可开发水电站群中筛选出来的,故其数值小于技术可开发资源。经济可开发资源与社会经济条件、各类电源相对经济性等情况有关,故其数量不断有所调整。

河川水能资源

(1)世界河川水能资源。据《国际水力发电与坝工建设1993年手册》的调查统计,全世界河川水能资源的理论蕴藏量为35万亿kW·h/a,技术可开发资源为15万亿kW·h/a,经济可开发资源为9.35万亿kW·h/a。各大洲的分布见表1。其中亚、非、拉发展中国家的理论蕴藏量占全世界的71.4%,技术和经济可开发资源分别占71.3%和65.8%;欧、美、苏、日和大洋洲等经济发达地区的理论蕴藏量占28.6%,技术和经济可开发资源分别占28.7%和34.2%。

世界各国对河川水能资源的开发利用程度很不相同,见表2。1991年各国已建水电站的年发电量占技术可开发资源的比重中,较高的有法国、意大利、瑞士、日本、美国、挪威等,在50%以上,瑞典和西班牙占

表 2 河川水能资源较丰或开发较多国家的资源和利用情况表
(按技术可开发水能资源大小排序)

国 家	理论蕴藏量 (亿 kW·h/a)	技术可开发资源 装机容量/年发电量 [万 kW/ (亿 kW·h)]	经济可开发资源 装机容量/年发电量 [万 kW/ (亿 kW·h)]	1991 年已建常规水电 装机容量/年发电量 [万 kW/ (亿 kW·h)]	技术可开发 资源利用率 (%)
中 国	59222	37853/19233	29000/12600	3788/1248	6.5
苏 联	39420	31574/14200	26900/10950	6356/2243	15.8
巴 西	30204	/11949	21300/11169	4608/2490	20.8
扎 伊 尔	13970	12000/7740	7000/4192	277/63	0.8
加 拿 大	12398	18489/7185	10858/5930	6027/3053	42.5
印 度	26378	/6000	8400/4500	1841/717	12.0
美 国	10630	14670/5294	/3760	7350/2755	52.0
哥 伦 比 亚	12900	/5208	9300/4182	670/242	4.6
委 内 瑞 拉	3350	/2772	7000/2617	1099/365	13.2
土 耳 其	4330	/2160	3562/1266	712/227	10.5
挪 威	5560	/1720	/1350	2663/1083	63.0
阿 根 廷	5350	4450/1720	/760	627/159	9.2
墨 西 哥	5000	5353/1596	2034/994	784/252	15.8
日 本	7176	3279/1347	/1143	2085/892	66.2
瑞 典	2000	/1300	/950	1632/623	47.9
意 大 利	1500	/765	/641	1426/423	55.3
奥 地 利	1500	/750	/537	1060/317	42.3
法 国	2660	/720	/645	2008/567	78.8
南 斯 拉 夫	1100	/660	/475	700/201	30.5
西 班 牙	1504	/656	/600	1406/314	47.9
瑞 士	1440	/410	/370	1168/301	73.4

注：1. 1991 年已建常规水电装机容量及年发电量，未包括抽水蓄能电站。
2. 主要资料来源：《国际水力发电与坝工建设 1993 年手册》；各国自己公布的资料。

表 3 中国河川水能资源按地区分布表

地 区	理 论 蕴 藏 量		技 术 可 开 发 资 源		
	年发电量 (亿 kW·h)	比重 (%)	装机容量 (万 kW)	年发电量 (亿 kW·h)	比重 (%)
全国总计	59222	100	37853	19233	100
华 北	1077	1.8	692	232	1.2
东 北	1062	1.8	1200	384	2.0
华 东	2632	4.4	1790	688	3.6
中 南	5614	9.5	6744	2974	15.5
西 南	41463	70	23233	13050	67.8
西 北	7374	12.5	4194	1905	9.9

注：表中未包括台湾省资源。

表 4 中国河川水能资源按水系分布表

水 系	理 论 蕴 藏 量		技 术 可 开 发 资 源		
	年发电量 (亿 kW·h)	比重 (%)	装机容量 (万 kW)	年发电量 (亿 kW·h)	比重 (%)
全国总计	59222	100	37853	19233	100
长 江	23478	39.6	19724	10275	53.4
黄 河	3552	6.0	2800	1170	6.1

续表

水 系	理 论 蕴 藏 量		技 术 可 开 发 资 源		
	年发电量 (亿 kW·h)	比重 (%)	装机容量 (万 kW)	年发电量 (亿 kW·h)	比重 (%)
珠 江	2933	5.0	2485	1125	5.8
海、滦河	258	0.4	214	52	0.3
淮 河	127	0.2	66	19	0.1
东北诸河	1341	2.3	1371	439	2.3
东南沿海 诸 河	1810	3.1	1390	547	2.9
西南国际 诸 河	8489	14.3	3768	2099	10.9
雅鲁藏布 江及西藏 其他河流	13994	23.6	5038	2968	15.4
北方内陆 及新疆诸河	3240	5.5	997	539	2.8

注：表中未包括台湾省资源。

表 5 中国潮汐能技术可开发资源分布表

省 (区)	平均潮差 (m)	装机容量 (万 kW)	年发电量 (亿 kW·h)	比重 (%)
全国总计		2157.5	618.7	100
辽 宁	2.57	58.6	16.1	2.6
河北、天津	1.01	0.5	0.09	—
山 东	2.36	11.8	3.6	0.6
江苏、上海	1.6~5.7	0.1	0.04	—
长江口北支	3.04	70.4	22.8	3.7
浙 江	4.29	880.3	264.1	42.7
福 建	4.20	1032.2	283.9	45.8
广东、海南	1.38	64.9	17.2	2.8
广 西	2.46	38.7	10.9	1.8

注：未包括台湾省资源。

(曹学敏)

shuini

水泥 (cement) 细磨的矿物质水硬性胶结材料。水泥加适量水搅拌成塑性浆体，在常温下产生物理和化学变化，能在大气中或水中凝结硬化，进而具有一定的强度和胶结力。它可将砂石等松散材料胶结成坚硬且耐久性很强的水泥砂浆和混凝土，是工程建设中使用最广泛的一种多功能人工建筑材料。配有钢筋的水泥砂浆或水泥混凝土，是生产受拉构件的良好材料。

水泥的分类 随着水泥工业的发展，世界各国除生产出许多优质通用水泥外，还生产出各种专用水泥和特种水泥。

(1) 通用水泥。土木建筑工程中最常用的水泥，分为硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和混合硅酸盐水泥等。它们是由硅酸盐水泥熟料与各种混合材料组成。硅酸盐熟料的矿物成分主要是硅酸三钙、硅酸二钙、铝酸三钙和铁铝酸四钙。

(2) 专用水泥。主要有油井水泥、耐热水泥、水玻璃型耐酸水泥和砌筑水泥等。它们主要用于油、气井和化工等工业部门。

(3) 特种水泥。其种类繁多，水利水电工程中大量使用的有大坝水泥，如硅酸盐大坝水泥、矿渣硅酸盐大坝水泥、普通硅酸盐大坝水泥和低热微膨胀水泥等，多为大体积混凝土采用。在受硫酸盐侵蚀部位常用抗硫酸盐硅酸盐水泥。其他如高铝水泥、自应力水泥、快硬硅酸盐水泥等则用于锚杆补强或堵漏等施工中。另外在建筑装修等工程中常用白水泥，它可掺入颜料，调制各种美丽的彩色。

水泥的主要性质 有比重与容重、细度、强度、凝

结时间、安定性和水化热等。

(1) 比重与容重。普通水泥的比重一般为 3.1，容重一般为 1300kg/m³。

(2) 细度。即水泥颗粒的粗细程度。按中国 GB175-85《建筑材料水泥的标号及品质标准》规定，对水泥的细度要求为 0.08 mm 方孔筛筛余不得超过 12%。另外也可以其比表面积表示（即一克水泥的总表面积 cm²/g）。普通水泥的比表面积为 3500cm²/g 左右。水泥颗粒越细，其强度越高。

(3) 强度。水泥产品的强度以标号表示。水泥的标号代表砂浆试件 28 天的抗压强度试验值。中国水电站采用最多的水泥标号为 325、425 和 525 三种。

(4) 凝结时间。分为初凝时间和终凝时间，水泥加水搅拌到开始凝结丧失工作度的时段称为初凝时间，到凝结終了产生强度的时段称为终凝时间。中国 GB175-85《建筑材料水泥的标号及品质标准》规定，一般水泥的初凝时间不得早于 45 min，终凝不得迟于 12 h。

(5) 安定性。指水泥在硬化过程中体积变化的均匀性，水泥中游离氧化钙、氧化镁或三氧化硫含量较高时，可能导致水泥结构不均匀变形而破坏水泥结石。

(6) 水化热。水泥与水作用产生放热反应，在整个水化过程中放出的这种热量称为水化热。水化热能加速水泥硬化、增进强度，但大体积混凝土积聚的热量过高，如不使之散发，会使混凝土产生温度应力而导致混凝土开裂或破坏。

(章景安)

shui sheliu

水射流 (water jet) 从管、槽、喷嘴以水股状泄出的水体，进入静止或流动着的水域或空气中的流动形态。是流体力学中自由紊流的一种类型。低速水射流可能是层流型的，但实际工程中的水射流大多数属紊流型，如冲击式水轮机的喷嘴出流、自来水管的出流、喷灌设备的管嘴射流、消防水机的射流、工业控制用射流元件的液体射流、泄水建筑物上的挑流水股、电站冷却水出流和环境工程中污水排放等。

无论是淹没水射流或抛射于空气中的水股，都不受固体边界的约束，具有自由边界，在惯性力、重力、阻力、粘性力和表面张力的综合作用下，自由边界逐渐扩散。与此同时，射流水体与周围流体相互掺混，射流断面沿程递增，断面平均流速沿程递减，掺入射流的质量流则随之增加，但断面总动量沿程保持不变，遵循射流动量守恒原理。

水射流的自由界面因粘性剪切作用而逐步扩散形成与外流的掺混流层，称为射流边界层。进入空气中的

高速水射流,自由边界的扩散常导致水流掺气,水股破碎,甚至水体雾化。

紊动射流理论是在射流动量扩散、热量扩散、混合物质质量扩散等射流物质守恒条件和运动方程的基础上建立的,对于水射流的研究,目前多限于二维(平面)情况或轴对称情况,而且多采用半经验的理论方法求解。

水电工程中的水射流问题,主要是挑流消能有关内容,如:计算挑射水股的射程,以确定下游冲刷坑的位置;研究射流逐段(如坝面水流,空中水股,进入下游水垫后的流动)的消能率,从而估计河床被冲刷的深度;分析挑射水股回落至下游河道时激起的波浪与反弹形成的水雾,以确定挑流雾化区范围,合理布置水电站厂房、出线 and 开关站。

(时启燧)

shuitou

水头 (water head) 水电站上、下游水位差。也叫落差,是水电站能量的两个要素之一。水电站上游水位为进水口水位。下游水位,对冲击式水轮机为喷嘴中心高程;对其他型式的水轮机为尾水位。

净水头 扣除水头损失后的水头。未扣除水头损失的叫毛水头,落差常指毛水头。水流经过水电站水工建筑物(如闸门、隧洞、渠道、调压井及压力管道等)时,产生水头损失。水头损失分沿程摩阻损失与局部损失两部分。水头损失与流量平方成正比。坝式水电站的水头损失较小,引水式水电站则较大,有时可达总水头10%左右。

水头的集中与利用 水电站主要有两种方式集中水头:①筑坝壅高上游水位。②利用天然河道的坡度修建坡度小的引水建筑物(如隧洞、明渠)形成水头。高水头水电站一般具有较优的经济性,世界上有许多数百米乃至千余米水头的水电站。平原河流由于地形、地质、淹没及综合利用(如航运)等限制,往往只能修建低水头电站,水头有时只有十余米,甚至几米。

水头的变化特性 水电站运行中的水头随入库流量和运行方式而变化,因而有平均水头、最大水头和最小水头。水头较高的径流式水电站,水头变化较小。具有调节水库的水电站,其水头主要随库水位而变化,最大水头往往出现在库满时,最小水头多出现在库空时。水电梯级上游担负调节任务的水电站,由于死水位较低,其最小水头常常只有最大水头的60%~70%。低水头水电站,水头主要决定于电站下泄流量(发电流量及泄洪流量),当下泄流量大时,由于尾水位升高,导致水头减小。一天内,因进行日调节,各小时出力不同,水头也是有变化的。

具有调节水库的电站,为了增大调节流量,在枯水期需消落水位,导致水头的降低。水电站出力正比于调节流量和水头的乘积,故为了获得最大发电效益要兼顾调节流量和水头。在规划、设计中需正确选定死水位和水库调度方式,使调节周期内获得最大的发电和综合利用效益,达到最有效地利用水资源的目的。

特征水头 为了正确选择水轮机机型和直径,还需正确选择水电站设计水头和计算电能加权平均水头。电能加权平均水头的权重为电能,以下式表示

$$H_e = \frac{\sum_{t=1}^T H_t \times E_t}{\sum_{t=1}^T E_t}$$

式中 H_e 为电能加权平均水头, m; T 为计算时段数; t 为时段序号; H_t 为 t 时段净水头, m; E_t 为 t 时段电能, kW·h。

在选择水轮机时,要尽量使水轮机最大效率在 H_e 附近。

(伍宏中)

shuitu liushi

水土流失 (water and soil losses) 由水力、重力、风力、冻融等外营力侵蚀引起的水土资源的破坏和损失的现象。土壤侵蚀(soil erosion)从广义理解常被用作水土流失的同义语。严重的水土流失使地形破碎,土壤肥力下降,旱涝灾害频繁。同时,泥沙大量进入江河,淤塞水库,抬高河床,给江河治理工作带来很多困难。水土流失的原因主要是自然侵蚀,不适当的人类活动也能加剧水土的流失,如破坏植被、陡坡开荒、不合理的耕作方式以及开矿筑路造成的大量弃土等。

中国水土流失的地区分布很广,重要的有西北黄土地区、南方红壤丘陵山区、东北黑土漫岗丘陵地区和华北土石山区,其中西北黄土地区的水土流失最为严重。水土流失面积达43万 km²,其中11万 km² 年侵蚀模数超过10000 t/km²。窟野河的神木—温家川之间(面积1347 km²)的年侵蚀模数高达35000 t/km²。

为了研究水土流失规律,制定治理方案,需要对不同地区的水土流失程度进行分级。土壤侵蚀强度国际尚无统一标准,根据中国1984年颁发的规定,土壤侵蚀的程度可以按每年每 km² 上流失的土壤重量或每年平均土壤流失厚度确定,分级标准如表。

为了防治水土流失,合理利用水土资源,需要制订水土保持规划。20世纪80年代以来,中国广泛推行了小流域综合治理规划,以小流域为单元,根据流域内的水土资源和社会经济发展状况,合理确定生产发展方向和农林牧副各业的用地比例和位置,布设各项水土保持措施,安排实施计划和财力、劳力的投入过程,使

水土保持工作和当地经济协调发展。

土壤侵蚀强度分级指标表

级 别	年平均侵蚀模数 (t/km ²)	年平均流失厚度 (mm)
微度侵蚀	<(200,500, 1000)	<(0.16,0.40, 0.80)
轻度侵蚀	(200,500,1000) ~2500	(0.16,0.4, 0.8)~2.0
中度侵蚀	2500~5000	2.0~4.0
强度侵蚀	5000~8000	4.0~6.0
极强度侵蚀	8000~15000	6.0~12.0
剧烈侵蚀	>15000	>12.0

从地表土壤被侵蚀的型式,可分为水力侵蚀、重力侵蚀和风力侵蚀等类型。

水力侵蚀 在降雨和径流作用下形成的侵蚀,是土壤侵蚀的主要类型。水力侵蚀有面蚀和沟蚀两种方式,面蚀主要发生在坡耕地以及植被较差的荒坡上;沟蚀则是径流集中成股流,冲刷土壤并切入地面,形成大小沟道的过程。水力侵蚀的强度取决于降水特征、地形、土壤和植被情况。降水特征包括雨量和降雨强度两个方面。历时较长、分布均匀的降雨,有利于植物生长,能减少土壤的侵蚀,而强度很高的暴雨则常造成严重水土流失。陡峻的地形增加径流的流速,会加强对地表土壤的冲刷。具有水稳性团粒结构的土壤则有较强的抗冲刷和保水的能力。植物的覆盖有利于截持降雨,减少雨滴的打击力量,减缓流速和增加入渗,对涵养水源和减少侵蚀有重要意义。

重力侵蚀 地表坡地表层土石物质在重力作用下失去平衡所产生的流失现象。产生重力侵蚀的条件有土质松软、岸坡陡峻、植被稀少、河床下切等,当土石受到其他外营力(如降水、径流、地震等)作用时能激发重力侵蚀。侵蚀的形式有滑坡、崩塌和泻溜等。这类侵蚀的特点是在短时间内集中地向河沟输送大量泥沙,特别在水力的共同作用下形成泥石流,爆发突然,来势凶猛,具有很大的破坏力,在短时间内搬运大量固体物质,甚至能使江河短时堵塞断流。

风力侵蚀 在风力作用下地表土壤遭到破坏和吹蚀的现象。这类侵蚀不受地形限制,常在广大的地区内发生。在比较干旱和缺乏植被的地区,4~5 m/s 的风速就会产生土壤风蚀。在极大的风速下,风蚀可发展成尘暴。

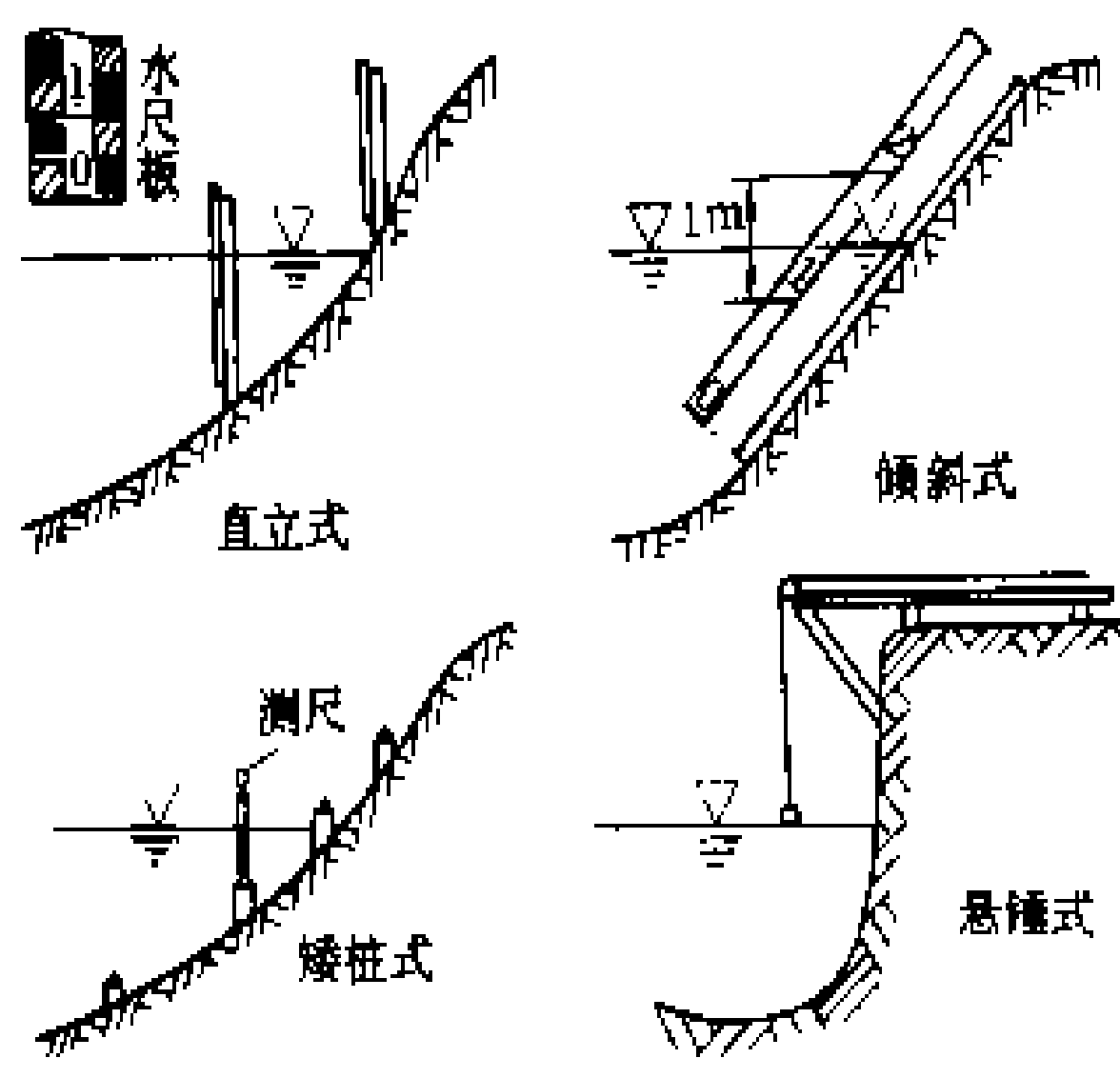
参考书目

辛树帜,蒋德麒主编.中国水土保持概论.北京:农业出版社,1982

(张 仁)

shuiwei guance

水位观测 (stage observation) 对水位升降变化过程的测量和记录。水位系指河流或其他水体的自由面相对某一基面的高程。水位资料是水利水电建设、防洪抗旱的重要依据,亦为航运、海港、城市供水、木材浮运等国民经济建设所必需。根据连续水位记录及水位与流量关系,可以推算流量和分析洪水传播规律。同时也作为一种水流情况的标志,与其他水文要素如流量、泥沙、水温、冰情等一并观测。



水尺型式示意图

水位观测设备,常用的有水尺及水位计两类。水尺为直接观测水体水位而设置的标尺,有直立式、倾斜式、悬锤式和矮桩式4种,见图。将水尺读数加水尺零点高程求得水位。水尺零点高程为水尺零点与基面的高差。水位计为自动记录水位变化过程的仪器,水位计的类型有浮子式、压力式、气泡式、超声波式等,根据河流条件及需要选用。由于水位遥测系统及长期自记水位计(包括磁带与固体电路储存数据的水位计)等先进技术的发展,无人值守水位观测得以实现,水文数据的自动收集、传输和计算机加工处理等技术也迅速发展。

水位观测的位置应选择在河道顺直、断面比较规则、水流稳定、无分流、斜流的河段,并尽量避开观测不便及有大量工业废水和城市污水排入的地点,使观测成果具有代表性及准确性。

(李久昌)

shuiwei - liuliang guanxi

水位流量关系 (stage - discharge relation)

江河、渠道横断面上的水位和流量之间的对应关系。即以流量Q为横坐标,水位H为纵坐标的水位流量关系曲线,简称H-Q曲线。水位流量关系曲线除在水文站的资料整编中,用以将连续的水位资料转换为连续的流量资料外,在工程设计和施工中常用以推求坝址、厂房尾水出口处、导流洞进出口及引水渠进口

等处某种流量下的水位高程。因此水位流量关系是工程设计中一项基本资料。

天然河道为恒定流状态、断面稳定且不受下游水位影响时， $H-Q$ 曲线为单一线，如图 1。洪水期，由于流量涨落或断面有冲淤变化，一次洪水过程 $H-Q$ 曲线常呈绳套形，如图 2。当断面水位受下游壅水影响， $H-Q$ 曲线为以下游水位作参数的一组曲线，如图 3。

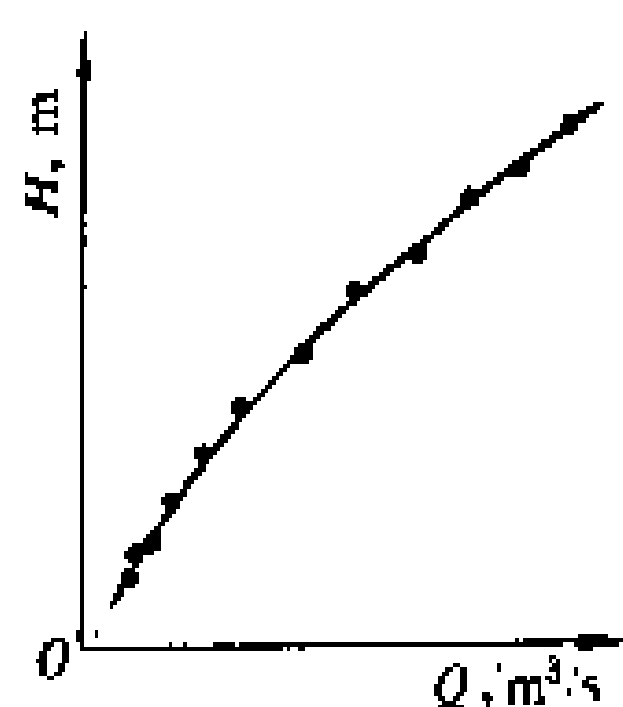


图 1 稳定的水位
流量关系

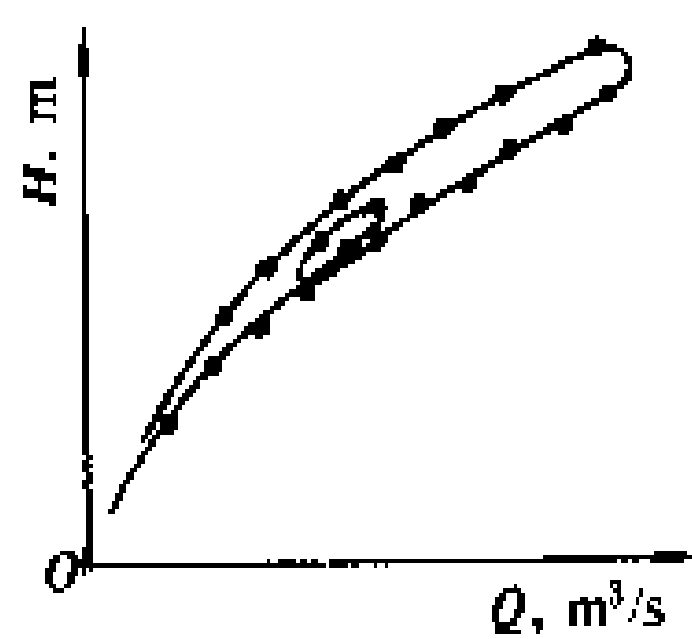


图 2 不稳定的水位
流量关系

厂坝区水位流量关系的确定分为坝址附近有水文站和无水文站两种情况。当坝址附近有水文站时，可根据测流断面的实测资料，点绘水位流量关系，一般尚需进行高低水位部分外延。常用的外延方法有：①利用水位-流速关系；②利用 $H-(1/n) \times$

\sqrt{I} 关系；③利用 $Q-A\sqrt{R}$ 关系。其中， H 为水位， n 为糙率， I 为比降， A 为有效过水面积， R 为水力半径。当断面有冲淤变化或受洪水涨落影响，其水位流量关系不稳定时，需先修正为单一的水位流量关系线，再按上述方法外延。当坝址河段无水文测站时，一般应在坝址河段设置专用

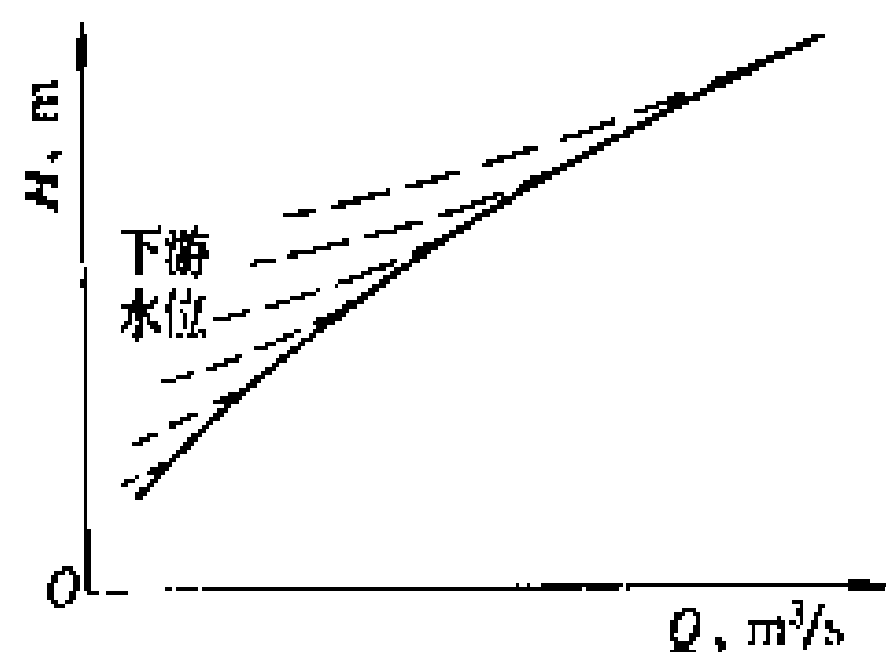


图 3 受下游水位影响的
水位流量关系

水文站或水位站，取得几年的观测资料后，再与上下游水文站资料相联系，推求各设计断面的水位流量关系。

工程修建后，由于施工堆碴，下游河道形态常会发生变化，因此，工程设计中，应估计工程修建后水位流量关系可能的变化。

(顾传智)

shuiwen dizhi ceshi

水文地质测绘 (hydrogeological mapping)

对地下水和与其有关的各种地质现象的调查测量工作。它是认识水文地质条件(地下水分布、埋藏、补排、动态及水化学特性等)的基本方法。其成果是为开发利用地下水和工程处理、排水进行勘探、试验的基本资料。水文地质测绘工作一般分三个阶段进行：准备工

作、野外测绘及内业整理。

准备工作 ①根据测绘目的、任务及地形地质条件确定测绘范围和比例尺。②充分搜集和分析测区的水文、气象、地质、井泉、钻孔及航片、卫片等资料，对测区的地质构造和水文地质条件作初步的了解。③查勘测绘区的地形、交通条件和居民点的分布情况，而后编制测绘工作大纲。

野外测绘 ①工作方法。首先要现场校对已搜集的资料，并据此布置测绘路线和观测点，选择测区典型地质剖面，编制地层柱状图，按测绘比例尺确定地层的填图单位，然后全面开展测绘工作，测绘比例尺大于 1:5000 时测点需用仪器定位。在外业工作中随时整理草图和记录。②测绘工作内容。对测区各时代地层的岩性、结构、厚度、产状分布和含水性进行全面观察与描述；观察研究褶皱形式与储水的关系，断层带含水及阻水的部位，裂隙密集带的富水程度；研究地貌与水文地质条件相关性，特别在第四纪沉积物发育区尤为重要；了解地表水与地下水的关系，观察彼此间的补排现象，如无支流河段的水量突变、浑水段出现清水流、岸坡涌泉等现象；研究地植物和自然现象，如滑坡、沼泽化、盐渍化等的关系；测定地下水化学成分及水温等。

内业整理 测绘外业工作结束后，要立即清理标本、照片及素描图等原始资料，绘制各种图表，如汇总表、平面图、剖面图等，最后编写测绘说明或测绘报告。

(崔诗礼)

shuiwen dizhi shiyan

水文地质试验 (hydrogeological test)

定量研究岩土体渗透特性和地下水水流条件的方法。它是水利水电工程地质勘察工作的组成部分，通过试验可为评价工程建筑物区水文地质条件、地下水源及工程设计提供水文地质参数。水文地质试验包括：抽水试验、压水试验、涌水试验、注水试验及地下水流速、流向测定等。

抽水试验 利用提水或吸水工具在井孔中抽水，研究井孔涌水量及其与水位下降的关系。抽水点的影响半径和含水层的水文地质参数，为计算基坑涌水、坝基、水库、渠道的渗漏等提供参数。抽水试验一般采用单孔进行，在重要建筑物地段且水文地质条件复杂的情况下，要求提供更准确的渗透参数时才采用群孔抽水的方法。抽水试验前应做好抽水试验设计，包括抽水孔和观测孔的布置，造孔要求及抽水设备的规格，试验技术要求，计算公式的选择及资料的整理等。抽水开始时，先做一次试抽，了解设备的最大降深值，以确定试验的降深次数及每次降深量。试验中定时观测动水位

和涌水量,读数稳定后,再延续到规定的时间方可结束这一次降深的抽水试验,一般是进行三次降深。全部试验结束后,将所测得数据绘制出 Q (涌水量)- s (水位降深)、 $s-t$ (时间)、 $Q-t$ 关系曲线,计算含水层的渗透系数、导水系数、影响半径等。

压水试验 在一定的水头压力下,将水压入钻孔试验段的岩体中去,记录压入水量直到规定的流量稳定时间为止。试验结束后,求得在1m水头压力下,1m长的试验段岩体每分钟的吸水量,即单位吸水量(ω)。该值表示岩体的相对透水性,是水工建筑物地基防渗处理设计和检查灌浆效果的依据之一。

目前,中国水电系统已开始使用国际上通用的吕荣(Lu)试验。该试验方法与中国国内现行的压水试验方法近似,主要区别是压力(p)大、压力阶段多,一般按三级压力,五个压力阶段进行试验,即 $p_1-p_2-p_3-p_2-p_1$,最大的 p_3 为1MPa。试验后整理绘制 $p-Q$ 曲线,计算出透水率,以吕荣(Lu)值表示,即在1MPa压力下每米试段每分钟的平均漏水量,或表示为 $L/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa})$ 。

涌水试验 用在承压含水层内,测定含水层在孔口以上保持一定水头时井孔可涌出的水量,亦可据以计算含水层的渗透系数。中国水电工程地质勘察部门主要是用抽、压水试验求取水文地质参数。

注水试验 一般有钻孔注水和试坑注水两种方法。①钻孔注水。即往钻孔中注水,抬高水位,使水流由孔内向孔外运动,形成以钻孔为中心的反漏斗,量测各水位时的稳定漏水量,按注水井公式计算岩层的渗透系数。②试坑注水。即在试坑底挖一深50~60cm,长、宽各为30cm方形坑或直径为37.75cm的圆形坑,坑底铺2cm的砂砾石层。然后向坑内连续均匀注水,使坑中水保持一定水位,记录其稳定漏水量,然后按达西定律近似计算渗透系数。

地下水流速流向的测定 ①在一个井(孔)或溶洞投放示踪剂,在另外的地下水露头点(井、孔、溶洞、泉等)进行观测,根据投放点和观测点之间的相对位置和距离以及示踪剂到达观测点所需的时间求得地下水的流向和流速。②在一个井(孔)中投放导电介质,在地面用物探方法测定地下水的流向。此外,当地下水流速较大时,可用井孔流速仪测定其流速。

(崔诗礼)

shui wen di zhi

水文地质 (hydrogeology) 研究地下水对水工建筑物及其周围环境的影响,查明地下水的水质分布和运动规律,为对地下水的评价、处理提供必要的资料。

水电工程中的水文地质工作主要有水库渗漏、浸没、坝基和绕坝渗漏、基坑涌水、地下建筑物的外水压力、地下水对库岸稳定的影响、引水隧洞和渠道的渗漏以及地下水对混凝土的侵蚀性等几个方面。

水库渗漏 库水通过库周与库底透水岩层(其中最严重的是喀斯特通道)向邻谷渗漏因而降低电站的发电效益。评价水库是否产生渗漏,水文地质勘探工作要在查明区域地层、岩性、构造和地貌的基础上,进一步查明透水岩层的分布规律、喀斯特洞穴的连通和充填情况;相对隔水层的空间分布规律及其隔水程度;地下水的补排关系,以及地下水分水岭的位置、高程。当邻谷的河水位高于水库设计蓄水位;水库周边有连续可靠的相对隔水层阻隔,相对隔水层的顶部高程均超出设计蓄水位;或河间地块的地下水分水岭高于水库设计蓄水位时,水库不存在向邻谷渗漏问题。当水库某些地段存在渗漏问题时,评价水库能否兴建,则需结合渗漏范围、漏水量大小、处理的难易程度和工程量的大小等进行具体的技术经济分析。

浸没 水库蓄水后,地下水位壅高,使居民点、工业区、矿山和农田的地下水位(包括毛细管饱和带)相应壅高,地下水位超过了某一临界深度时,上述地带则将遭受浸没。地基浸没的临界深度与地基土在浸水饱和后强度的变化特点、冬天土壤的冰冻深度、建筑物特性等因素有关;农田浸没的临界深度与当地的气候、土质、作物的种类、耕作方法、地下水的矿化度以及灌溉、排水措施等因素有关。浸没区的防治措施,一般是采取降低地下水位的排水、疏干等工程措施。

地下水对库岸稳定的影响 库岸存在下列情况时,稳定性较差。①库岸存在软弱岩层如凝灰岩、粘土岩、片岩、页岩或黄土类土、膨胀土等组成的高陡边坡。②库岸岩体存在顺坡向软弱结构面,或岩体被多组软弱结构面切割形成稳定性差的棱形体。③库岸存在滑坡体或巨厚的松散堆积体时,水库蓄水和水位变动,常影响库岸的稳定,尤其是近坝库岸的失稳,对大坝的施工和运行的安全危害更大。水库水位升高,使底滑面岩体饱水,抗剪强度降低,同时该部分岩体新增加的浮托力使底滑面的有效应力减小,从而又进一步降低了底滑面的抗剪强度。当水库水位较大幅度骤降时,库岸岩体中的地下水位来不及随着水库水位下降,还会产生动水压力,使库岸更易失稳。

坝基渗漏与绕坝渗漏 水库蓄水后,在拦河大坝的上、下游形成水位差,在水位差的作用下,库水经坝基和两岸坝肩岩(土)体中的孔隙、裂隙、破碎带或喀斯特通道等向下流渗漏。前者称坝基渗漏,又称坝下渗漏;后者称绕坝渗漏;又称坝肩渗漏。由于坝基和坝肩一带岩体中的地下水渗透途径短,坡度大,单位宽度内

的渗漏量要比其他地区大,对坝基和坝肩抗滑稳定有很大影响,危害也较大,因此比其他地区的渗漏显得更加重要,若坝基为坚硬岩体,库水沿坝基和坝肩岩体中的裂隙或破碎带渗漏时,在坝基和坝肩岩体中将产生渗透压力。坝基的渗透压力使坝基滑动面上的法向荷载减小,因而也减小了法向荷载所产生的抗滑力。同理,坝肩处的渗透压力使坝肩岩体的抗滑力也因之减小,这对坝基和坝肩以及坝肩下游边坡稳定都是不利的。由于坝基渗漏或绕坝渗漏,还可能使坝基与坝肩岩体中的软弱夹层、断层破碎带产生软化、潜蚀(管涌)等现象而降低坝基或坝肩岩体的抗滑力与承载力。若坝基为松散土层,表层渗透系数较小、底层渗透系数较大组成的双层结构地层,下游又有大量的农田或居民点时,还要研究由于坝基渗漏和绕坝渗漏是否会使坝基松散土层产生管涌或流土破坏,和使下游农田或居民点产生浸没。为了减少坝基和绕坝渗漏量,防止渗流对坝基产生的渗流破坏,防止渗流对软弱夹层产生软化、潜蚀,减小渗流对坝基产生的渗透压力,需对坝基和坝肩岩体进行防渗和排水处理。

防渗处理措施按岩性可分为三类。①坚硬裂隙岩层的防渗处理措施。②松散土层的防渗处理措施。③喀斯特的防渗处理措施。

坚硬裂隙岩层一般采用灌浆帷幕防渗。当相对隔水层埋藏不深时,常采用封闭式灌浆帷幕;若相对隔水层埋藏过深,根据防渗的要求,也可采用悬挂式灌浆帷幕。灌浆帷幕的材料可根据岩层的可灌性选用水泥灌浆或化学灌浆。如坝基存在断层破碎带或其他软弱岩层,根据破碎带的特征、产状,结合地形和坝的形状、尺寸等情况,辅以混凝土防渗井、防渗墙或铺盖等防渗措施,则效果更好。

松散上层坝基的防渗处理措施主要有垂直防渗、水平防渗和排水减压三种。①垂直防渗。常采用的有粘土截水墙、混凝土防渗墙、泥浆防渗槽、灌浆帷幕、钢板桩和水泥高压旋喷式帷幕。②水平防渗。当砂砾石层透水性强,渗流稳定性差,厚度大,垂直防渗比较困难,而坝址附近土料很丰富,常采用水平铺盖防渗。但水平防渗出逸坡降大,常需于下游辅以排水反滤措施,才能保证坝基渗流稳定。也可用水平铺盖和垂直灌浆帷幕组合应用。③排水减压。对于表层为弱透水层,底层为强透水层的双层结构地基,在渗漏量允许的情况下,也可采用在强透水层中排水的办法来减少渗透压力,防止对坝基产生渗透破坏,一般采用坝下设排水减压片、排水槽或排水坝趾,但需注意防止排水地层发生管涌。

喀斯特的防渗处理是根据喀斯特发育特点和分布规律,因地制宜地进行,常用的有铺盖法、封堵法、截水墙法和灌浆帷幕法。

基坑涌水 在基坑开挖时,由于基坑处水位下降、压力减小,周围基岩(或土体)中的地下水涌向基坑,当水量过大,常给施工带来很大的困难,甚至使基坑边坡失稳,有时承压水头过大,还会使基坑底部隆起,常采取灌浆和排水减压相结合的措施防治。

引水隧洞、渠道的渗漏 引水隧洞、渠道沿线的地下水位低于隧洞或渠道中的水位,将产生渗漏,渗漏量的大小视沿线岩层的渗透系数大小而定。防治办法一般采用粘土封闭、混凝土衬砌、浆砌石衬砌等法。

地下建筑物的外水压力 当地下水位高于地下厂房与不充水隧洞洞顶,或地下水位高于引水隧洞洞内水位,且上述围岩的渗透系数又大于衬砌的渗透系数时,衬砌将承受外水压力。外水压力的大小视地下水位的高低与围岩渗透系数和衬砌渗透系数相差的倍数而定。防治办法是采取排水减压或灌浆与排水相结合的处理方法来减小外水压力。

江水、地下水对混凝土的侵蚀性 由于各处地下水所处的地质环境不同,在运动中所富集的盐类、有机质、气体也有所不同,它随着空间与时间而变化。因此需要在每年不同水文季节取水样进行水质分析,评价它们对混凝土、金属材料有无侵蚀性;评价它们能否作为混凝土拌制和养护用水或生活饮用水。水质分析的试验项目根据试验目的来选定。

为了查明地下水在上述问题中的影响程度,需通过调查、地质测绘、勘探,查明具体的水文地质条件。为了更准确、完全地了解含水层与相对隔水层的渗透系数,还需进行压水(注水)或抽水等水文地质试验。浸没调查时还需进行土壤毛细管上升高度的测定。有时地质构造复杂,加上岩层的各向异性,水文地质条件一时难以查清,可借助于地下水长期观测资料进行反馈分析来取得所需资料,常得到较满意的效果。

发展简史 中国对于地下水的认识和利用,数千年前即已开始,相传唐尧时代就已“凿井而饮”。公元前250年战国时四川自贡采盐的自流井,已经深达几百米,比法国于公元1126年在阿尔士瓦省打的自流井要早1500~2000年。中国的灌溉和水利工作,也开始得很早,公元前256~前251年李冰父子在四川岷江上兴建了有名的都江堰。至少在公元前300多年以前就已开凿坎儿井来浇灌土地。公元前450年开始修凿大运河,运河长达1700多km。这些巨大的水利工程中遇到许多的水文地质问题。中国古代的一些文献典籍中,如易经、禹贡、水经以及历代各省、府、州、县所修的地方志中,有许多关于地下水的记载。这些古代生产实践中积累起来的宝贵经验,一直未能加以总结,使之发展成为一门独立的科学。同一时期,在世界上水文地质也同样未得到发展。



最近 100 多年来,由于大量水利水电、铁路隧洞、油田、采矿等巨大工程的建设,以及解决工矿企业和城市的供水,使水文地质得到了飞速的发展,形成了一门独特的水文地质学,并出现了许多分支。如地下水动力学、矿床水文地质学、油田水文地质学等。中华人民共和国建立以后,开展了大规模的经济建设,水文地质学得到了飞速的发展。在水电工程方面,兴建了新安江、乌江渡、白山、云峰、龙羊峡、刘家峡、天生桥一、二级、葛洲坝等大型水电站,在进行工程地质勘察的同时,也进行了水文地质勘察工作。通过这些工程的生产实践与对外交流,水电工程的水文地质正在不断丰富与完善。

(赵鹤勤)

shuiwen diaocha

水文调查 (hydrological investigation)

为弥补水文基本站网观测资料的不足,采用查访、考证、勘测等方式收集水文资料的工作。水文调查的主要内容有:暴雨调查、洪水调查、枯水调查及用水调查等。广义的水文调查还包括流域地形、地质、泥沙来源调查,冰情调查及地下水调查等。

中国近代水文调查始于 1915 年的西江洪水调查。20 世纪 50 年代以来中国普遍开展了主要江河的水文调查,查证了长江 1870 年及黄河 1843 年特大洪水。在枯水调查中发现了四川涪陵白鹤梁自唐朝广德二年(公元 764 年)以来的枯水位石刻,将长江枯水记录上延至距今 1200 余年前。1963 年海河及 1975 年淮河两次特大洪水调查都取得系统资料,已整编刊印。中国主要江河洪水调查资料已于 1988 年汇编成《中国历史大洪水》出版。

暴雨调查 为复核大暴雨实测资料和延长暴雨资料系列,以便计算设计暴雨。需要对无资料地区或缺测早期和近年大暴雨地区进行调查。调查的主要项目包括:暴雨中心位置、走向、暴雨量、强度、过程及笼罩面积等(见暴雨调查)。

洪水调查 为计算设计洪水并提高成果的可靠性,要求查明历史上和近代未测到的大洪水发生年份、时间,调查洪水痕迹、涨落过程、河床冲淤变化,并推算洪峰流量,再结合历史文献的考证,分析其重现期(见洪水调查)。

枯水调查 为论证水电站的保证出力,分析工农业用水、城市生活用水和环境用水的保证率以及航运规划,需要调查枯水期最低水位、最小流量、是否发生断流,并查明原因。

用水调查 水能规划及水资源评价中要进行水量平衡计算,需要调查流域或坝址以上调出和引入水量

及过程,水库蓄、泄水量和过程,工农业用水、城市生活用水及环境用水的水量及时间分配等。

(唐友一)

shuiwen jisuan

水文计算 (hydrological computation)

根据水文实测资料对年径流、洪水、暴雨和固体径流等的有关量的分析与计算。目的在于预估长时期内可能出现的水文情势,为水资源开发利用的规划、设计、施工和运行提供水文设计数据。为了确定水电站的装机容量和发电量等基本参数,必须通过水文计算预估可能提供的水量及水能蕴藏量;为保证水利水电工程防洪安全,在规划设计和运行时,需要估算当地在未来运行时可能发生的洪水情况,以便拟定防洪设计方案,确保工程的安全运行。水文计算不可能确切预报出工程建成后一定时期的水文特征值变化过程。只能估算其出现的概率和超过设计标准的风险。

水文计算的主要内容 有以下 5 个方面。

(1) 年径流计算。计算通过河流某断面符合设计标准的全年和分季、分月等时段径流量及多年、年、月径流系列。具有年调节水库的水电站,需要计算符合某一设计标准的河流年来水量及其年内月、旬分配;具有多年调节性能的水库,需估计径流年际的可能变化,提供多年、年、月径流系列;无调节性能的水电站和其他项目的引水、供水、航运工程,要求计算年内超过某一流量值的可能性。

(2) 设计洪水计算。计算符合指定防洪设计标准的洪水数值。主要有设计洪峰流量、不同时段的设计洪量 and 设计洪水过程线、设计洪水的地区组成分析计算及年内不同时期(如某些月份或施工期)的设计洪水。

(3) 设计暴雨计算。由暴雨资料推求设计洪水时,需要推求符合设计标准的设计暴雨,进而推求设计洪水。包括各种历时的设计雨量及其时程分配和地区分布;对特别重要的工程,还应估算当地的可能最大暴雨,供推算可能最大洪水用。

(4) 固体径流计算。固体径流指水流挟带的悬移质泥沙和推移质泥沙颗粒及其所附着的污染物。主要计算它们的多年平均值及其在年内的分配情况,为研究水库淤积和下游河道冲淤及水质变化提供依据。

(5) 其他水文计算。为工程设计需要,分析特定河段和断面的水位流量关系;北方河流要估算水工建筑物施工和运行时期可能出现的河流冰情;在感潮河段,要求确定设计最高、最低潮水位和潮型。

水文计算的基本方法 主要是考虑长期水文过程的随机性,应用概率论和数理统计的原理和方法,通过对实测水文资料作频率分析,估算相应指定设计频率

的水文特征值(如年最大洪峰流量,不同时段洪量,年、月、日平均流量等)。适应不同的水文资料条件,可以采用不同的计算方法。

有较长时期实测水文资料时,可直接采用频率分析方法,按以下步骤计算:①收集、审查所需的基本水文资料;②对水文特征值系列进行频率分析并求出符合设计标准的水文特征值;③选择符合设计要求的时空分布作为典型,按设计值放大或缩小,求得设计条件下的水文特征值及其时空分布;④计算成果合理性分析论证。

实测水文资料短缺时,利用水文现象之间的联系,可采用不同方法展延资料。常用的方法有:①相关分析法。建立水文变量之间的相关关系,利用观测系列较长的参考资料以延长观测系列较短的水文资料。例如根据降雨径流关系,由降雨资料延长流量资料。②地理插值及水文比拟法。依据水文现象在地理上的分布规律,由水文特征值等值线图或水文特征值与其他地理要素之间的经验关系,求得工程设计所需要的设计水文特征值。也可采用水文比拟的方法,把水文特性相似流域上的水文特征值、统计参数或典型时空分布,直接或经过修正移到无资料的设计流域,作为设计依据。此外要充分利用调查到的历史特大暴雨、特大洪水资料,这对提高计算成果可靠性有重要的作用。上述各种方法适用范围并没有明确的界线,而且相对于频率的分析要求,现有的数十年水文资料是不够充分的,应当采用各种途径分析论证,合理选用设计成果。

参考书目

刘光文主编,水文分析与计算,北京:水利电力出版社,1989
华东水利学院主编,水工设计手册,第二卷,北京:水利电力出版社,1984
(朱元钰 林益冬)

shuiwen kance

水文勘测 (hydrological survey) 为系统收集水文资料而进行的水文测验和水文调查工作。水文勘测内容包括:①水文站网的规划、布设、调整;②技术标准的制订,测验仪器、设备和测验方法的研究;③野外测站的观测,基本项目有降水、蒸发、水位、流量、泥沙、冰情、水温及水质等;④进行洪水、暴雨、枯水、冰情和人类活动影响等水文调查;⑤对资料作系统的整编、汇编和刊布;⑥对已建工程的水库进行水文泥沙观测和实验研究。

水电开发不同阶段要求水文勘测工作有相应的深度和广度。规划阶段需要流域或规划河段水文资料,一般从已有水文测站上收集,并在选作第一期工程的河

段上进行一些专门的观测和调查。设计阶段根据需求和可能,在坝区、厂区、水库回水河段、施工料场等处设立专用水文测站,并进行详细的洪水和枯水调查。施工阶段根据施工预报方案,在现有基本水文测站基础上增设防汛专用测报站。运行阶段要为保证工程安全,验证并完善设计阶段提出的运行方案和为改进今后设计工作而开展的水文观测和实验研究工作。各阶段的工作既有不同的特点又要保持工作的连贯性,逐步深入,保证水文资料长期不间断地积累,以适应水文现象多变性、随机性的特点。

水文勘测工作是在分散的测站上进行观测和在不同的河段或区域内进行调查,资料需要有高度统一性,以便分析和应用。因此水文勘测既要根据具体情况选用适合的仪器设备,又要严格按照有关规范规定进行工作。

水文勘测工作是在人类防止水害、兴修水利的过程中逐步发展起来的。公元前3500至公元前3000年,埃及为灌溉引水开始对尼罗河进行水文观测。17世纪法国塞纳河开始有降雨、蒸发、流量等观测项目和记录。在中国,2000年前李冰父子已用石人作水尺在都江堰观测水位,历代在很多江河上有洪水、枯水石刻和记载。近代正规的水文观测开始年代:雨量1841年(北京),水位1865年(汉口),流量1910年(海河小孙庄)。为水电开发设置的专用水文观测开始于1946年(黄河上铨站)。1949年以来中国已建立了全国的基本水文站网,并不断调整充实,同时制订了测验规范,统一了测验方法,充实改进了测验仪器和设备。使水文勘测工作水平逐步完善和提高。随着科技进步,遥测遥感、超声波、同位素及用计算机整理存储资料等新技术已逐渐应用于水文勘测工作。

(庄德楨)

shuiwen pinlu fenxi

水文频率分析 (hydrological frequency analysis) 根据水文观测资料组成的样本系列,分析水文变量与出现频率(或重现期)之间的定量关系。水文频率分析的目的是为水利水电工程规划设计提供所需的具有频率含义的设计水文数据,为水文计算工作中的一项重要组成部分。水文频率分析的主要内容为:选择频率曲线的线型和确定频率曲线的统计参数,从而绘制频率曲线。

频率曲线的线型 把水文变量和频率表达成一定的数字关系式,绘制成图形即为频率曲线。其线型常用的有:皮尔逊Ⅲ型(P-Ⅲ)分布曲线(美国)、耿贝尔分布曲线(法国)、对数皮尔逊Ⅲ型分布曲线(美国)等。多年分析成果证明,皮尔逊Ⅲ型分布是一种适应性较



好的线型。为了便于在相同的基础上进行地区综合比较,中国在水利水电工程水文计算规范中规定,除特殊情况外,一般采用皮尔逊Ⅲ型分布曲线。其数学表达式为

$$P = \int_x^\infty \frac{\left(\frac{2}{\overline{X}C_vC_s}\right)^{\frac{4}{C_s^3}}}{\Gamma\left(\frac{4}{C_s^3}\right)} x^{\left(\frac{4}{C_s^3}-1\right)} e^{-\frac{2x}{\overline{X}C_vC_s}} dx$$

式中 Γ 为伽玛函数; \overline{X} 为数学期望值; C_v 为说明概率分布离散程度的特征,称为离差系数; C_s 为说明概率分布对称性的程度和方向的特征,称为偏差系数。水文变量的概率分布特征 \overline{X} , C_v , C_s , 一般是根据样本的经验频率分布通过统计分析得出的,习惯上称为统计参数。为便于计算皮尔逊Ⅲ型曲线已制成专用的数字表,可根据统计参数的数值查得曲线的坐标值。

频率曲线统计参数的确定 参数的估算方法常用的有适线法、矩法、极大似然法等。中国主要采用适线法,按下列步骤进行。

(1) 参数初估值。根据水文系列,一般用矩法公式初步计算各统计参数值。计算公式如下

$$\begin{aligned} \overline{X} &= \frac{\sum x_i}{n} \\ C_v &= \frac{\sigma}{\overline{X}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \overline{X})^2}{(n-1)\overline{X}^2}} = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - n\overline{X}^2}{(n-1)\overline{X}^2}} \\ C_s &= \frac{\sum (x_i - \overline{X})^3}{(n-1)\overline{X}^3 C_v^3} \end{aligned}$$

式中 x_i 为系列变量 ($i=1, 2, 3, \dots, n$); σ 为均方差; n 为系列项数。

(2) 适线。根据初估参数值,用适线的方法调整计算参数,即在概率格纸上用频率曲线去拟合样本系列的经验点据,其经验频率 P_m 采用数学期望公式计算

$$P_m = \frac{m}{n+1}, \quad m=1, 2, \dots, n$$

最后取用拟合较准的频率曲线及其统计参数。适线的方法有目估适线法和优化适线法。目估适线法以目测曲线与经验频率点据拟合较好时为准;优化适线法用计算机进行,常采用一定形式的目标函数,使其最小为准,目前较多采用离差平方和最小或离差绝对值之和最小等。

(3) 适线成果合理性检查。现有水文观测资料一般较短,为防止因资料代表性不够或计算方法的某些不当而带来误差,需要对适线成果在时间上(单站各长短时段)和空间上(情况相似的地区)作合理性检查,例如相同频率短时段的水文值不能大于长时段的水文值;相邻站同类水文系列的统计参数不能相差太大以及是否符合地区变化规律等。

通过参数初估、适线和综合对比分析,可得到比较合适的频率曲线及其统计参数。

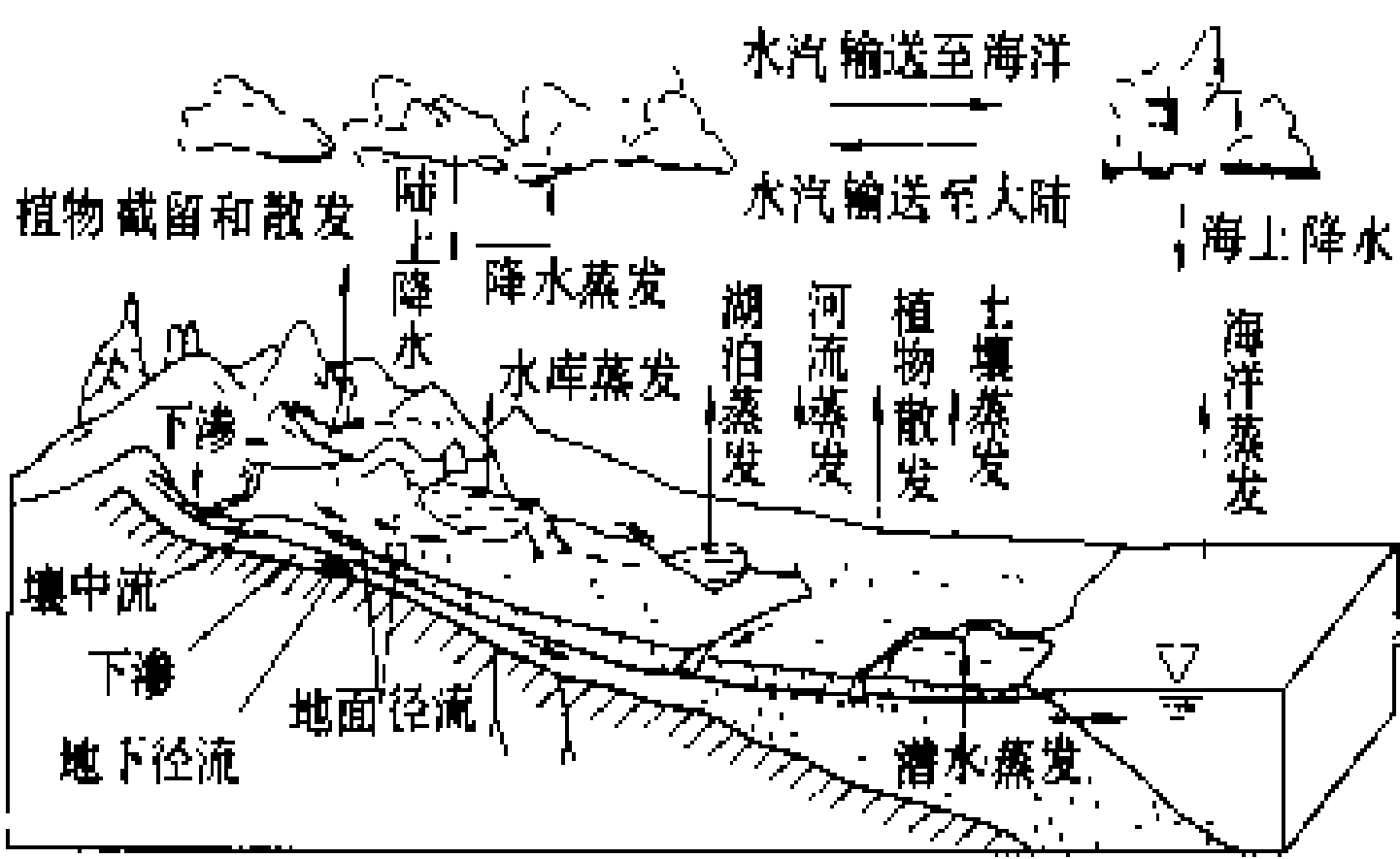
参考书目

金光炎. 水文统计计算. 北京: 水利出版社, 1980
(林益冬)

shuiwenxue

水文学 (hydrology) 研究地球大气层、地表及地壳内水的分布、运动和变化规律,以及水与环境相互作用的学科,属于地球物理学范畴。通过测验、分析计算和模拟,预报自然界中水量和水质的变化和发展,为开发利用水资源、控制洪水和保护水环境等方面提供科学依据。

水文循环 地球上的水在太阳辐射能和地球引力场的作用下,通过蒸发、水汽输送、降水、入渗和径流等过程不断周而复始转化的现象。水文循环由一系列复杂的过程和路径组成,如图。水从海洋和陆地蒸发形成大气中的水汽,水汽被气流抬升和携带输送到高空和各地,在适当条件下凝结,以雨、雪、雹等形式降落到海洋或陆地上。陆地上的降水一部分被植物截流,另一部分沿地面流动形成地表径流,或渗入地下补给土壤水和地下水,形成壤中流或地下径流。地表径流、壤中流和地下径流汇入河流,注入海洋或内陆湖泊,完成全球的水文循环。水文循环中水的存在、运动、变化统称为水文现象。自然界的水文现象受太阳辐射、地球公转、大气环流、气候、自然地理和环境条件等众多因素的综合影响,这些因素在时间上和空间上不断变化并相互影响,致使水文现象具有周期性、随机性和地区性的特点。



水文循环示意图

20 世纪以来,人类活动对水文现象的影响日益明显。人们修建大型水库和灌区工程、跨流域引水工程以及大面积的水土保持工作,改变了天然径流、洪水和输沙过程。工业高速发展,大量未经处理的废水排入江河,污染了水质。大规模砍伐森林、开矿和修路破坏植被,增加了水土流失。

学科内容 水文学与气象学、海洋学、地质学、自

然地理学等学科关系密切。广义的水文学可分为水文气象学、海洋水文学和陆地水文学。水文气象学主要研究大气中水汽的变化规律,包括大气中的水循环和水量平衡,以蒸发、凝结、降水为主要方式的大气与下垫面的水分交换,是水文学与气象学的边缘学科。海洋水文学主要研究海洋的水文现象,包括波浪、潮汐和海流等,属海洋学的内容之一。陆地水文学主要研究陆地上各种水体的水文现象和运动规律。随着生产发展的需要和研究工作的深入,已形成河流水文学、湖泊水文学、冰川水文学、地下水水文学等分支。陆地水文学中直接为工业、农业、交通等生产部门服务的内容称为应用水文学。狭义的水文学通常指陆地水文学和应用水文学。

工程建设中不断提出的课题和需求,促进了水文学的发展,逐渐形成一门应用水文学知识于工程建设的学科——工程水文学,作为应用水文学的一个分支,主要研究与工程规划、设计、施工和运行有关的水文问题。主要内容有:①水文测验。利用水尺或自记水位计、流速仪、泥沙采样器、测验缆道或测船等仪器和手段,按水文测验规范要求测量水位、流量、泥沙和水质等资料,并经过资料整编刊印,以备工程设计应用。②水文预报。在研究水文规律的基础上,根据上游水文站和雨量站前期和现时出现的有关信息,对未来几小时或几天水文现象的变化进行预测,为水电站施工、运行及河湖防汛服务。③水文计算。按照工程建设的要求对水文资料进行分析计算,为工程规划、设计、施工和运行提供水文数据和成果。水文计算的基本内容包括设计年径流及系列、设计暴雨、设计洪水和年输沙量等。

研究方法 概括为:①成因分析法。即以收集水文站网的大量实测资料及室内试验资料为基础,研究水文现象的形成过程、物理机理和相互关系,建立水文现象与影响因素的定量关系或水文模型。②数理统计法。水文现象兼有确定性和随机性,可以把某些水文现象看作随机事件,用概率论和数理统计的原理和方法,对某些水文现象进行频率分析,推求各种频率(或重现期)的水文数据。③地区分析法。气候与自然地理条件具有地区性分布的特点,水文现象也有一定程度的地区相似性,因此可研究水文要素分类和分区的特征值或建立区域性经验公式,或绘制各种特征值等值线图 and 分区图。

简史及发展 为了战胜洪水灾害,人类很早就注意对水文现象的考察和研究。早在4000多年前,大禹治水采用疏导方针,说明已认识“水流就下”的水文规律。秦朝李冰已在都江堰设“石人”观测水位。水文发展成为一个学科是从15世纪以后欧洲人发明并应用水文仪器为标志。雨量计、蒸发器和流速仪先后问世,

使水文观测进入了科学定量的阶段。1674年P. 佩罗(P. Perrault)提出水量平衡概念,逐渐发展和形成近代水文学理论。20世纪,特别是第一次世界大战后,大量兴起的防洪、灌溉、水力发电、交通工程,提出了越来越多的水文课题,先后发展了单位线、频率分析和下渗理论等,使水文研究逐渐理论化和系统化。

20世纪50年代以来,由于经济发展和人口增长,人类对水资源的需求急剧提高。供水量不足和水质恶化促使社会各界越来越重视水资源保护。现代高科技的发展,如卫星遥感、微电子技术等,促使水文信息的采集、传输、存储和检索工作有了长足的进步。水文观测手段的改进,水文资料数量的扩大和精度的提高,加强了水文研究的基础。计算机的应用,使水文分析计算的功能和速度有了质的变化,为水文科学发展创造了条件。由于人类活动的影响空前的增长,在很大程度上改变了自然环境和生态系统,要求水文学突破现有研究领域,发展和形成一些交叉学科和边缘学科(如环境水文学、随机水文学及都市水文学等),从宏观上全面地评价、分析和控制各种人类活动。

(朱元姓 林益冬)

shuiwen yubao

水文预报 (hydrological forecasting) 根据前期或现时水文、气象等有关因素出现的信息,对未来一定期限内水文现象变化的预测。水文预报属于应用水文学,与国计民生关系密切。为做好河川湖泊的防洪防凌、水利水电工程的建设和运用、航运交通以及农田抗旱保墒等方面的工作,均需及时了解和掌握准确的水文信息和预报。

按预见期的长短,水文预报分为短期、中期、长期预报。自发布预报的时间到预报的水文现象出现的间隔时间为有效预见期。短期预报如洪水预报、河道相应水位(流量)预报、降雨径流预报等,其预见期一般为几小时到几天。中、长期预报如枯期月径流预报、年径流预报、汛期洪水总量预报等。结冰河流关于封冻、开河日期等冰情现象预报的预见期比较长,也属于中、长期预报。中、长期预报预见期的长短目前尚无统一的规定,一般认为在15天以上一年以内属于长期预报。还有对较大范围一年以上旱涝趋势预报称为超长期水文预报。

预报方案是作业预报的基本依据。开展水文预报,需先编制预报方案。根据有关规定,预报方案建立后,对其有效性和可靠度要进行评定和检验。按照许可误差标准衡量,合格率在70%以上的预报方案,可用于作业预报,合格率在60%~70%的预报方案,用于参考性预报,合格率低于60%的不能用于作业预报,只



能作参考性估报。

按预报内容,水文预报分为洪水预报、枯水预报、冰情预报、台风暴潮预报及泥沙预报等。

洪水预报 为防洪的非工程措施之一,一般根据河道洪水波运动原理,利用河道上游水文站所测得的相应水位(流量)进行河道流量演算来预报洪峰水位(流量)、洪峰出现时间、洪水涨落过程和洪水总量等。也可根据降雨径流关系,通过产、汇流计算来做预报。(见洪水预报)

枯水预报 为合理制订发电、灌溉、航运以及城市用水计划,需进行枯水径流预报。一般是在分析研究流域前期蓄水情况和河川退水规律的基础上,预报枯水期径流量及最低水位等。

冰情预报 冬季结冰的河流、流凌、封冻对航运、水利水电工程施工和水库运行都有影响。某些河段,封冻、开河期常因发生冰塞、冰坝壅水而造成灾害,皆需及时获得冰情预报以便采取防治措施。冰情预报的内容一般有:流凌开始日期、封冻日期、冰厚、解冻日期和解冻形势(文开江或武开江)、解冻最高水位和最大流量、冰塞、冰坝壅高水位等。

台风暴潮预报 根据台风、气压、海浪、潮汐的变化规律,结合海岸地形因素,预报最高潮位及出现时间。为沿海城市及农村防洪服务。

泥沙预报 为掌握多泥沙河流沙情需进行泥沙预报。一般是通过水、沙关系,根据来水量预报泥沙量。在多沙河流上修建的水库,为保持有效库容,根据上游来沙量预报适时排沙,是水库减淤可行的技术措施之一。

参考书目

长江流域规划办公室. 水文预报方法. 北京: 水利电力出版社, 1979

(夏方佐)

shuiwen zhanwang

水文站网 (hydrological network) 在一定地区或流域内,由各类水文测站所组成的有机集合体。设置水文站网的目的是通过测站观测资料的综合分析,按照某一实用精度,内插确定区域内任何地点的基本水文特征值,以满足各方面对水文资料的需要。

站网发展 中国在春秋时代已有各郡县向中央报雨的制度,说明当时已开始观测降雨。明代,沿黄河已有观察、传递水情的制度。从1865年起,汉口开始有连续水文记录。至1937年,有水文站403处(缺台湾省数字,下同)。1949年后,站网迅速发展,1956年进行了全国水文基本站网规划。1965年和1978年作过两次较大范围的调整和充实。目前除边远地区外,规划

已基本完成。到1988年底全国各类水文测站数见表。

在世界上,近代由于水资源紧缺和污染严重,对水文信息的需求提高,水文站网迅速发展。如美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)所属水文站数,1929年为2238个,1980年增至16500个。英国水文站数,1935年为100个,1982年增至1400个。有些国家的站网是统一规划的,如苏联于1946、1968年作过两次基本站网规划。

1988 年底中国各类水文测站数

分类	雨量站	流量站	水位站	泥沙站	冰情站
站数	20097	1615	4713	3450	1672

注: 均按观测项目统计。

当前中国水文站密度为每万km²3.56站。东部较密,江苏、北京等省市在10以上;西部较稀,西藏、青海等省区在1以下。根据世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)123个国家和地区的资料统计,世界水文站密度平均为每万km²4.0,德国、瑞士、荷兰、日本等国家均在50以上。

测站分类 水文测站按性质分为基本站和专用站。基本站主要由水文部门负责建立和管理,由它组成的基本站网要与国家或地区的经济发展水平相适应,并能在当地水资源的开发和管理上避免发生严重缺陷。专用站能在提高内插精度和解决某一实用问题上弥补基本站网的不足。中国水电设计施工单位设立的站绝大部分为专用站。随着经济发展和对水文要素内在规律认识不断加深,对站网需要不断地进行调整充实。以科学的、经济合理的原则,对一个区域内的水文测站进行总体布局是站网设计的任务。站网设计内容包括:①确定水文分区;②确定站网密度;③选择站址;④明确设站年限;⑤各类站网协调配套。

站网分类 水文站网可分以下几类。

(1)雨量站网。观测降水(包括降雪、积雪)的站网,用以反映降水量的空间变化,补充流量资料的不足和作为水位流量预报的依据。为连续记录降水过程,雨量站网中要配备一定数量的自记雨量计。

(2)蒸发站网。用国家规定的标准蒸发器观测水面蒸发量的站网。蒸发量是水量平衡计算的重要因素之一。

(3)流量、水位站网。流量资料是解决水资源开发利用和大部分水文问题的基础。流量资料由连续的水位记录和一定数量的实测流量数据通过建立水位流量关系曲线推求,因此流量和水位测验应同时进行。站网设计时按大、中、小河分别布站。大河设控制站,中等

河流设区域代表站,小河设分类代表站。当流域内因人类活动改变原有径流特性时,要进行辅助观测和调查。

(4) 泥沙站网。悬移质泥沙、推移质泥沙是估计河床变化过程、确定入海沙量、研究水库和渠道等水利水电工程冲淤变化和制定排沙减淤措施的基本资料。一般按不同水文分区在流量站网中选择一定比例的站观测泥沙。在黄河及其他严重水土流失区,每个流量站都观测泥沙。

(5) 水质站网。了解河流、水库天然水化学特性和监测水质污染情况的站网。按土壤、地层岩性和水文条件,在干流控制河段、重点城市、工矿企业集中区和出入境把口处等河段布设测站,一般和流量站结合。

(庄德楨)

shuiwen ziliao

水文资料 (hydrological data) 水文站通过测验获得的各种水文要素的实测基本资料。包括水位、流量、比降、河道糙率、纵横断面、泥沙、水温、水质、冰情等。中国的水文资料还包括由水文原始记录整理汇编成的水文年鉴。广义的水文资料还包括经整理分析后的水文特征值统计、水文手册、水文图集以及有关洪枯水调查资料和记载历代洪涝水情的文献资料。

水文资料是工业、农业、交通、国防和科研等各部门广泛应用的一种基本资料。如水资源的评价、河流的开发利用、江河防汛、航运、农田灌溉、城市供水等都要以水文资料作为依据。

水文资料具有特殊的要求和条件:①获得水文资料的站网布局要合理,这样才能取得一条河流或一个流域的具有代表性的完整资料;②资料系列要长期连续,这样才能反映出一条河流水文特征的变化规律;③实测的数据要力求准确,符合规定的精度,这样才有实用价值。

在水电站的建设中,水文资料是工程设计的重要依据。水文计算规范中,对水文资料的搜集、整理和复查都有明确规定,要求对资料的全面情况作深入了解,对水文观测资料和整编成果应进行重点复查,对资料的质量作出评价。

(顾传智)

shuiwen zidong cebao xitong

水文自动测报系统 (automatic system of hydrological data acquisition and transmission) 对江河、水库流域内水文数据进行实时收集、通信和处理所设置的专用电子设备及其自动

化技术。利用水文自动测报系统可以实现防洪、供水、发电等优化调度,提高防洪能力和水资源利用的社会经济效益。

水文自动测报系统一般由一个中心站和若干遥测站组成。遥测站根据其性能分为水文遥测站(包括水文站、水库站、水闸站)和水位雨量遥测站。遥测站通过计算机自动使用各种传感器收集降水量、水位、流量和闸门开度等实时数据,并按规定时间和格式把这些数据发送到中心站。中心站则集中各遥测站发来的各项数据,经过计算机整理计算,及时作出洪水预报或发送到上一级或相邻系统的中心并打印出结果。

遥测站向中心站发送信息的基本方式有自报式、应答式两类。①自报式是各遥测站按约定方式自动向中心站发报。分为定时控制和增量控制两种。定时发报是按规定时间和测次到时即发报;增量控制是指降水量或水位每变化一定数量如降水量增加1mm,水位增减1cm即发报累积降水量或水位。②应答式是遥测站等待中心站发来询问后再回答,因此,要求遥测站的接收设备长期或定时段通电处于待命状态。根据具体情况和工作需要,也有的采用自报和应答兼容的方式,即系统内一部分遥测站为自报式发报,一部分遥测站为应答式发报,称为混合式。

通信方式有超短波无线电通信、短波无线电通信、流星余迹通信、卫星通信等。目前中国建成的水文自动测报系统多采用超短波无线电通信。几种通信方式优缺点:①短波通信设备比较简单、经济,传输距离较远。但抗干扰能力低,信号衰落现象严重,传输速率低,误码率高。②超短波通信的抗干扰能力和通信的可靠性随频率升高而增加,一般通信距离50km左右。超过50km或有高山阻挡时要增设中继站延长实际通信距离。但中继次数多可靠性就要下降,且增加建设投资。③流星余迹通信是离散的,不连续,时空分布不均,因而地面站所需功率要大,对接收站的要求也高,目前中国尚处于试点阶段。④卫星通信建站灵活不受地形条件限制,覆盖面大,通信质量高,适合大流域远距离通信,但目前中国的实践经验还很少。

日本、美国、意大利等工业发达国家,从20世纪60年代即相继生产使用水文自动测报系统设备并进入国际市场。中国自1979年以来开始研制并从国外引进少量水文自动测报系统设备,用于重要的防洪地段和水库工程。为统一技术标准,中国水利电力部于1985年颁发了SD159-85《水文自动测报系统规范》。

(夏方佐)

shuixi

水系 (river system) 汇集、输送和排泄径

shuǐ 水

流，有注入海洋或内陆湖泊的共同出口，并连接成一体、包括河流、湖泊的水道体系。由地表水及地下水分水线包围的汇集降水和来水到本水系的地域称流域，其面积称为水系的流域面积，亦称集水面积。当地下水分水线不易确定时，常以地表水的集水区分界。河流是指由沿地形的低凹带形成的输水河床及其水流，它是水系的输水通道。湖泊是指天然地形形成的可蓄水的洼地及其储存的水体，起汇集并调节水系径流的作用。

水系的分类 水系由干流及支流组成。有注入海洋、内陆湖泊的出口的河流称干流，注入干流的河流及其各分支河流称为支流。干支流一般呈树枝状，也有多条支流汇入同一湖泊后再注入干流的。支流的分级一般把直接注入干流的河流称为一级支流，注入一级支流的河流称为二级支流，依此类推。也有反向分级的，将没有支流汇入的河流称为一级支流，它所注入的河流称为二级支流，依此类推。在天然情况下，相邻水系之间没有互通的河道。

水系可分为入海水系和内陆水系。入海水系的出口注入海洋；内陆水系的出口或注入内陆湖泊或其河道尾闾由于水流逐渐枯竭而消失。入海水系和尾闾逐渐消失的内陆水系通常以其干流的名称做为水系的名称，例如中国的长江水系、印度的印度（India）河水系、美国的密西西比（Mississippi）河水系、中国新疆维吾尔自治区的塔里木河（内陆）水系等。而汇入内陆湖泊的水系常以内陆湖泊的名称命名，例如中国青海省的青海湖水系。入海水系又以其所注入的海洋名称划分归属，例如凡注入太平洋的所有水系统称太平洋水系。

中国的水系 中国各入海水系分别属于太平洋、印度洋和北冰洋水系。长江、黄河、珠江、黑龙江、海河、滦河、辽河、鸭绿江、图们江、淮河、钱塘江、闽江、韩江、澜沧江、红河等属太平洋水系；雅鲁藏布江、怒江等属印度洋水系；额尔齐斯河属北冰洋水系。中国入海水系的流域面积约占全国总面积的 2/3。中国内陆水系主要有塔里木河、伊犁河、叶尔羌河、黑河等。中国入海水系中的湖泊均为淡水湖，主要有长江水系的鄱阳湖、洞庭湖、太湖等，黄河水系的扎陵湖、鄂陵湖以及位于中国和俄罗斯两国边界属于黑龙江水系的兴凯湖等。内陆湖多为咸水湖。中国主要的内陆湖有青海湖、纳木错（湖）等。

世界主要水系 世界上流域面积大于 100 万 km² 的水系有：亚洲的鄂毕（Ob）河、叶尼塞（Yenisei）河、勒拿（Lena）河、黑龙江、长江和印度河；欧洲的伏尔加（Volga）河；非洲的扎伊尔（Zaire）河〔亦称刚果（Congo）河〕、尼罗（Nile）河、尼日尔（Niger）河、

赞比西（Zambezi）河；北美洲的密西西比河、马更些（Mackenzie）河；南美洲的亚马孙（Amazonas）河、拉普拉塔（La Plata）河。

世界最长的河流为尼罗河，长 6670 km；中国的长江长 6300 km，居世界第 3 位；流域面积和径流量最大的为亚马孙河，流域面积为 705 km²，平均流量为 12 万 m³/s。

（赵毓崑）

shuǐxià bàopào

水下爆破（underwater blasting） 爆破药包完全或大部被浸入水中的爆破技术。水下爆破适用于航道、港口及河道的扩宽、加深和清除暗礁工程，水下围堰及建筑物拆除工程，水工隧洞进口水下开挖工程（见岩塞爆破），防汛分流时炸除堤坝、防凌破冰及海上潜水救捞等特殊爆破工程。

水下爆破与陆地爆破的设计原理基本相同，但施工比较复杂，炸药及起爆装置在水下一定时间后将会损坏。由于爆破体周围包围的水是一种近乎不可压缩的液体，比重比空气大 780 倍，形成的压力将随着水深而增加，对爆破效果产生一定影响。在同等炸药量情况下，水下爆破所产生的爆震波要比地面大，而水冲击波又是水下爆破中特有的问题，其波阵面上的压力，对附近水中建筑物和船舶的破坏更为突出。

水下爆破方法 ①水下裸露爆破，又称水下表面爆破法。这种方法设备简单，操作容易，只在被爆介质表面敷贴防水药包即可起爆，常用于通航河道中炸除暗礁、清理沉积障碍及松动胶结紧密的砂卵石层等工程，单位耗药量大，爆破效率低，水冲击波破坏力大，一次爆深受限制。②水下钻孔爆破。与陆上钻孔爆破基本相同，只是需在船上或搭设的平台上定位钻孔，是目前水下爆破的主要施工方法，水下成孔后，需用护孔管保护以免泥沙堵塞。这种方法的单位耗药量小，效果好，但水下钻孔定位比较困难，精度难以检查。③水下药壶爆破，又称水下扩大炮孔法。爆炸力集中，钻孔量少，但只适用于岩体完整且覆盖层较薄的特大孤石、礁石或河床基岩较高的岩层。④水下洞室爆破。适用于岸边水下开挖量较大且有抛掷堆积条件的工程，如岩塞爆破。

水下爆破起爆方式 ①电力起爆。采用复式电爆网络，但不宜用铝（或铁）芯线作电爆网络导线，整个网络敷设后除量测导通电阻外，还要进行漏电量测。②遥控起爆。在湍急河流、浮游生物多的湖泊及风浪大的近海敷设电爆网络有困难时，用超声波或电磁波无线遥控起爆，但无线遥控引爆的成本高，可靠性差。

（王守道）

shuixia hunningtu shigong

水下混凝土施工 (underwater concrete construction) 将混凝土直接浇筑到水下指定部位的施工工艺。水下混凝土常用于修筑围堰、混凝土防渗墙、桥墩基础以及水下建筑物的局部修补等工程。在水下浇筑混凝土,为保持原有的水灰比,要防止外水进入混凝土拌和物内,还要防止水流的冲刷、扰动,以免混凝土产生分离或水泥砂浆流失,因此一般只适用于静水或流速较小的条件下。

常用的水下混凝土施工方法有导管法、压浆法和袋装法等,以导管法应用最广。①导管法。将若干导管装置在浇筑部位,底部伸入水中,管底端接近地基。管顶部设有贮料漏斗,利用起重设备吊住,并使可以升降。开始浇筑时,管内有以铅丝吊住的球塞,先在导管中浇适量的水泥砂浆,然后将导管和贮料斗内均灌满混凝土拌和物。这时再剪断铅丝使混凝土在自重作用下,迅速排出球塞,同时混凝土进入水中。浇筑过程不要间断,要使导管内经常充满混凝土,并保持导管底口始终埋在已浇的混凝土内,埋入的深度一般不少于1m。如此连续浇筑,同时缓慢提升导管,直至结束。如需要浇筑的混凝土量较大,将导管法与混凝土泵结合使用,可以取得较好的效果。②压浆法。在水下清基、立模并封密接缝后,用预填骨料压浆混凝土的方法进行浇筑。③袋装法。将混凝土拌和物装入麻袋或其他材料的袋子,依次沉放,堆筑在水中预定地点。日本曾采用一种水溶性薄膜的袋子,柔性较好,在水中溶化的时间稍长于混凝土的硬化时间。用这种袋子有助于提高堆筑体的整体性。浇筑水下混凝土时,在清基、立模、堆砌等工作中需有潜水员配合作业。

(王庭济)

shuiyue

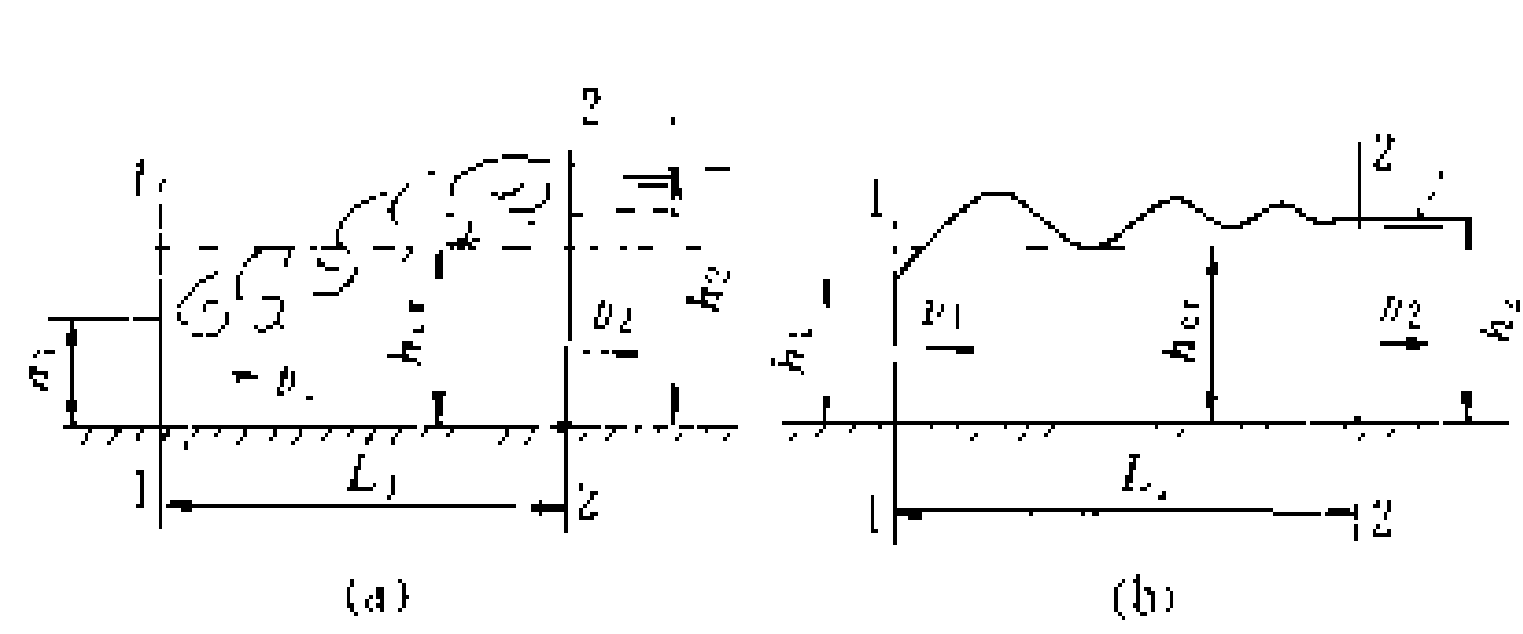
水跃 (hydraulic jump) 明渠水流由急流向缓流过渡时,自由水面出现阶跃旋滚或波状的明渠急变流态。水跃的基本形态是稳定旋滚或波状水面,如图。旋滚使水体掺混,卷入空气,使水流的部分机械能转化为热能而耗散,因此,泄水建筑物常利用水跃作为消能的主要手段之一。

实际工程中的水跃形态随消能结构物形式的不同,可以是面流旋滚、底流旋滚、屏流等;随下游水深的变化,又可形成远驱水跃、临界水跃、淹没水跃等;还有一些特殊形式的水跃,如斜坡上的水跃、平面扩散的三元水跃、管道内的有压水跃等。

水跃的水力因素是:跃前和跃后水深 h_1 和 h_2 (亦称水跃的共轭水深,m),相应的断面平均流速 v_1 (m/s)和 v_2 (m/s),见图,其中 h_{cr} 为临界水深。跃后

与跃前水深之差称为水跃高度

$$a = h_2 - h_1$$



水跃示意图

(a) 稳定水跃; (b) 波状水跃

水跃的基本方程是恒定总流的动量方程,对于平底棱柱形明渠,水跃方程为

$$\frac{\alpha_2 Q^2}{g A_2} + A_2 y_{c2} = \frac{\alpha_1 Q^2}{g A_1} + A_1 y_{c1}$$

式中 Q 为明渠总流量, m^3/s ; A_1 和 A_2 分别为跃前和跃后的过水断面面积, m^2 ; y_c 为过水断面重心距水面的深度,m;一般假定流速分布不均匀系数 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_0$ 。上列水跃方程的含义是:跃前、跃后两断面上单位时间流入的动量和断面上动水总压力之和保持不变。

对于平底矩形断面的明渠,共轭水深的关系为

$$h_2 = \frac{h_1}{2} (\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$$

式中,以跃前断面弗劳德(Froude)数 $Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gh_1}}$ 为水跃特征参数,则水跃长度 L_j 的经验关系式为

$$L_j = k(Fr_1 - 1)^m$$

或

$$L_j = c(h_2 - h_1)$$

其中系数一般用 $k=10.8$;指数 $m=0.93$; $c = \frac{10}{Fr_1^{0.32}}$ 。水跃的消能率因水跃形态、旋滚状况而不同,用水跃消能系数 K_j 表示(见表)

$$K_j = \frac{(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 3)^3}{8(\sqrt{1 + 8Fr_1^2})(2 + Fr_1^2)}$$

水跃消能系数表

Fr_1	水跃形态	旋滚状态	K_j
1~1.7	波状水跃	没有旋滚	0~0.05
1.7~2.5	弱水跃	许多小旋滚	0.05~0.18
2.5~4.5	摆动水跃	旋滚不稳定	0.18~0.44
4.4~9	稳定水跃	稳定旋滚	0.44~0.70
>9	强水跃	大旋滚	>0.70

(时启燧)

shuizhi

水质 (water quality) 天然水(地表水或地

shui 水

下水)的物理性质与化学成分。水质与气候、地质环境等自然条件密切相关。在自然和人为条件的影响下,水质随时间和空间有所变化。水质分析成果是评价水资源质量和水对混凝土建筑物侵蚀性的最基本的资料。

水的物理化学性质 水的物理性质主要包括颜色、气味、口味、透明度、温度、密度、导电性及放射性等。一般无污染的天然水是无色、无味、无臭、透明的。水的化学性质通常反映在离子成分、矿化度、氢离子浓度、硬度及游离气体等方面。①离子成分。天然水中分布最广、含量最多的离子为钠、钾、镁、钙、重碳酸根、硫酸根及氯等。②矿化度,又称总矿化度。指水中所含各种离子、分子、化合物的总量。通常以105~110℃烘干时所得的干涸残余物重量来表示。天然水按矿化度大小可分为淡水、微咸水、咸水、盐水及卤水。③氢离子浓度,即pH值。是衡量水的酸碱性指标。④硬度:可分为暂时硬度、永久硬度和总硬度。暂时硬度是指水煮沸时分解析出的钙、镁离子含量;煮沸后水中残余的钙、镁离子含量称永久硬度;暂时硬度与永久硬度之和称总硬度。根据硬度将水分为极软水、软水、微硬水、硬水及极硬水五级。⑤游离气体。主要有二氧化碳、氧、氮等。

水质分析 分为简分析、全分析和专门分析三种。简分析通常在野外进行,分析项目较少,优点是快而及时;全分析分析项目齐全,精度要求高;专门分析的分析项目及精度要求则根据具体任务的需要而定。

水质评价 随不同的利用目的(如生活饮用、灌溉、工业用水等),各有其水质的评价标准。在水电工程建设中,主要评价水质对混凝土的侵蚀性,中国已专门制定有SDJ19-78《环境水对混凝土侵蚀性的标准》。

(邹小安)

shui ziyuan zonghe liyong

水资源综合利用 (comprehensive utilization of water resources) 以获得社会、经济和环境总体效益最优为原则,通过工程措施合理调配河流的流量和水位,多目标地开发利用水资源,为各有关部门多重服务。

水资源利用包括兴利和除害两方面。兴利有水力发电、灌溉、供水、航运、漂木、水产养殖、旅游等;除害有防洪、除涝、防凌等。

水资源可能综合利用是由于:①水资源具有多方面的功能,如水力发电要利用水体所蕴有的能量;航运、水产、旅游等要利用水资源形成有利的水域和水体;而灌溉和供水则需要消耗部分水量。所以只要经过合理调配,可以充分利用水的各种功能,实现一水多

用。②各部门对水资源利用往往有共同的要求,如建造水库既壅高水位,又调节径流。水库壅高水位可为水电站提供发电水头,使水体蕴有的能量集中为水电站利用;为航运可加大库区水深,扩大水域,改善库区通航条件,提高通航能力;为灌溉和供水提高取水高程,扩大供水范围;为水产和旅游形成或扩大需要的水域面积和水体,改善水产养殖和旅游环境条件。水库调节径流,可贮存汛期多余的水量,转到枯水期利用,既为发电、航运、供水、灌溉等增大了枯水期可利用的水量,又可以减少洪涝灾害。只要合理调度水库,可使一库多用。③发电、灌溉、供水、航运等部门都是国民经济整体中的一个组成部分,需要协调发展,所以国家或地区的国民经济发展要求综合利用水资源,以获得最佳的整体效益。

各部门对水资源利用的要求既有互相一致的方面,又有可能不一致的方面。当水电站和其他部门对水量或水位的时空分配的要求不一致时,可以通过恰当地配置梯级水电站的水库位置和库容,合理选择水库参数,根据电力系统电源可互为补偿的条件而采取恰当的运行方式等措施,使矛盾得到缓解,或同时满足发电和其他部门的要求。

水力发电与其他部门在水资源利用上可能有的要求不一致的情况及可采取的措施如下。

(1)水电站为电力系统调峰,使其下游河段日内流量不稳定。电力系统负荷高峰时水电站需多放水发电,负荷低谷时水电站需少放水发电,甚至不发电,从而使其下游河道流量和水位在一日内变化较大,而航运或供水部门要求河道昼夜流量平稳,于是出现部门间对流量日内时空分布要求不同的矛盾。对此,可采取在水电站下游建反调节水库的措施来解决。利用反调节水库把上级水电站放出的不均匀流量调节成较均匀的流量再下泄。有时也可考虑水电站部分水量均匀下泄(在基荷区发电),部分水量不均匀下泄,以同时满足电力系统调峰和其他用水要求。

(2)发电和航运、灌溉等用水的要求在年内时空分布不同的矛盾。电力系统要求水电站在年内各月比较均衡地提供电量,而北方地区的航运分通航期和非通航期。通航期要求河道保持较大的流量,而非通航期对河道流量没有要求。灌溉也分灌溉期和非灌溉期,年内各月用水要求也不均衡。当存在这类矛盾时,可采取河流上下游水库联合调度的措施协调。其中一座水电站的水库按照航运、灌溉用水要求运行,灌溉期多发电,非灌溉期少发电,该水电站在年内不均匀供电的缺点再由其他水电站填平补齐,即在通航期或灌溉期少发电,其他时间多发电,以使两座或若干座水电站总发电量在年内各时期保持均衡。

(3) 发电与其他部门在水库最低运行水位方面的矛盾。有时发电要求增大水库水位变幅,以提高水库调节径流能力,使水电站在枯水期多发电。但航运为保持库区航道必要的水深,或者灌溉、供水为扩大供水范围而要求水库水位不低于某一界限。由于发电、航运和灌溉都可考虑替代措施解决,例如发电可考虑利用其他水电站进行补偿调节;航运可考虑适当的疏浚河道措施;灌溉可考虑部分扬水设施等方法弥补。因而可根据各方效益合理选择死水位及替代措施,兼顾各方面的要求。当库区淹没条件容许时,也可考虑提高正常蓄水位使各方要求都得到满足。

(4) 引水式水电站引水口以下至水电站之间原河道流量减少,甚至出现脱水段,与用水部门的矛盾。在航运、灌溉、供水、渔业用水要求较高而又没有其他经济合理的解决措施的河段,水力发电则尽量采用坝式开发而不采用引水式开发(见水电站)。若其他用水部门只需少量流量或可以另觅水源替代时,可按经济原则选用引水式开发,并保留一定下泄流量。

(5) 在水资源利用中建设调节水库和水库淹没损失之间的矛盾。由于梯级水电站的水库可以联合调度,可考虑上游水电站的水库直接或间接为下游水电站调节径流的作用,所以可在较大范围内合理选择水库库址和库容规模,以减少水库淹没损失或避免某一河段的淹没,达到对自然环境不利影响最小而又满足各部门对径流调节的要求。

(6) 为重复利用水库库容的调节作用,水电站水库可在不同时期采用不同的运行方式以协调兴利和防洪所需库容的矛盾。在汛期,水库为兴利目的允许的最高蓄水位(即汛期限制水位)可低于正常蓄水位,以增加为防洪目的而设置的防洪库容。汛期以后,为兴利目的允许的水库最高蓄水位上升到正常蓄水位,相应增加了兴利所需的调节库容。这种运行方式重复利用处于汛期限制水位到正常蓄水位之间的库容,汛期用于防洪,非汛期用于兴利,可协调防洪和兴利对库容要求的矛盾。

(7) 为弥补拦河坝截断河道影响通航、漂木等的不利影响,可采用设置不同类型的过船过木设施、鱼道或在下游设孵化场等措施解决。

在某一河流或河段的水资源开发中,各综合利用部门的主次关系不同。在解决各部门间对水资源利用的要求有矛盾时,考虑各部门的主次关系,通过合理地协调各部门的要求,研究可能采取的各种替代技术措施,在以各受益部门合理分担费用的前提下,按总体经济效益最优为原则,确定水资源综合利用方案,并通过行政程序予以确认。

水资源综合利用的意义有:①对水资源缺乏的地

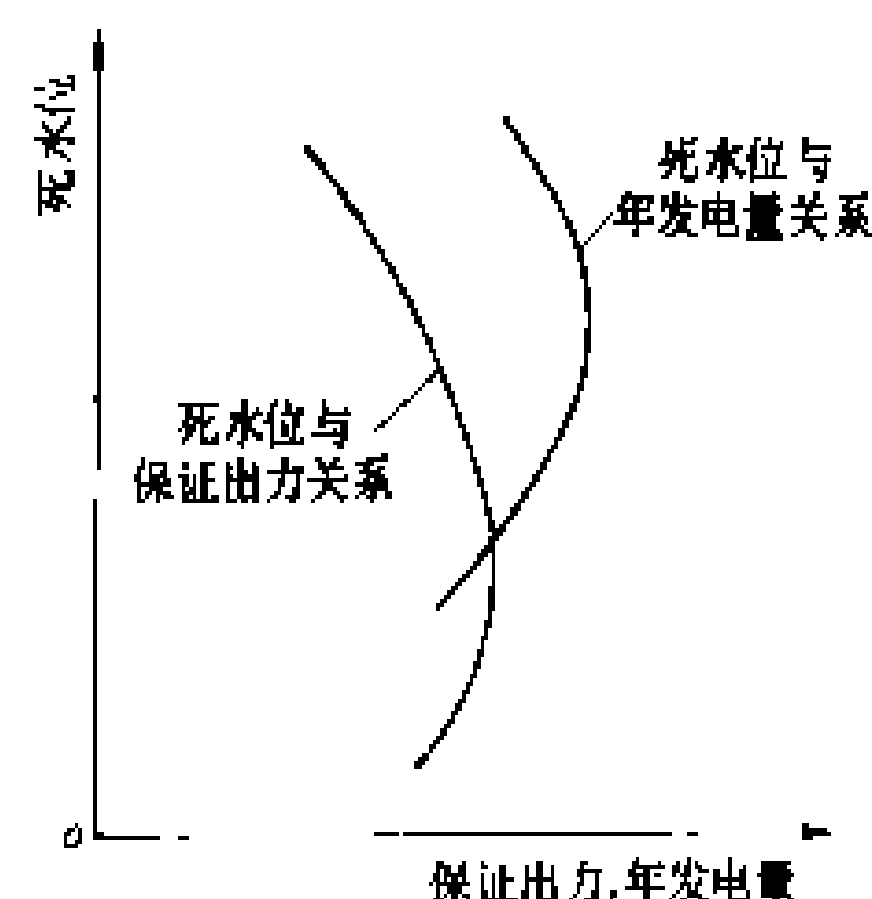
区或国家,可以缓解需要与可能不一致的矛盾,同时满足各部门要求,取得最大的经济和社会效益。②从总体上降低投资和运行费用,增大水资源开发利用的前景。

(赵毓崑)

死 水 位

死水位 (dead water level) 水库运行允许的最低水位。正常蓄水位至死水位的高程差称消落深度,与之相应的库容为调节库容,又名有效库容、兴利库容或活库容。死水位以下的库容为死库容。

水库运行中,死水位出现的频率,取决于其调节性能。日调节水电站,库水位每天都消落到死水位;年(季)调节水电站,库水位于每年的枯期末消落到死水位;多年调节水库,只在出现连续枯水年时,于枯水段末,库水位消落到死水位,其一般年份的最低水位,叫年消落水位,高于死水位。



死水位与保证出力、年发电量的关系示意图

在水库正常蓄水位确定以后,水库的调节库容取决于死水位的高低,较低的死水位,水库调节库容较大,可相应提高调节流量,但相应降低了水电站的平均水头。死水位较高,消落深度不大时,水库死水位每降低1m增加的库容较大,相应增加的调节流量也较大,而平均水头的减小值较小,因而其调节时段的平均出力增加。当死水位降低到某一数值后,降低1m死水位所增加的调节流量较小,平均水头降低值较大,其调节时段平均出力将减小。对死水位而言,调节时段的平均出力有一个最大值。保证出力的最大值出现在较低的死水位,年发电量最大值出现于较高的死水位(见图)。此外,当死水位过低时,可能由于水轮机的过水能力限制而减小水电站的预想出力。因此,死水位的选择,必须兼顾保证出力,年发电量和电站的容量效益,进行技术经济比较。

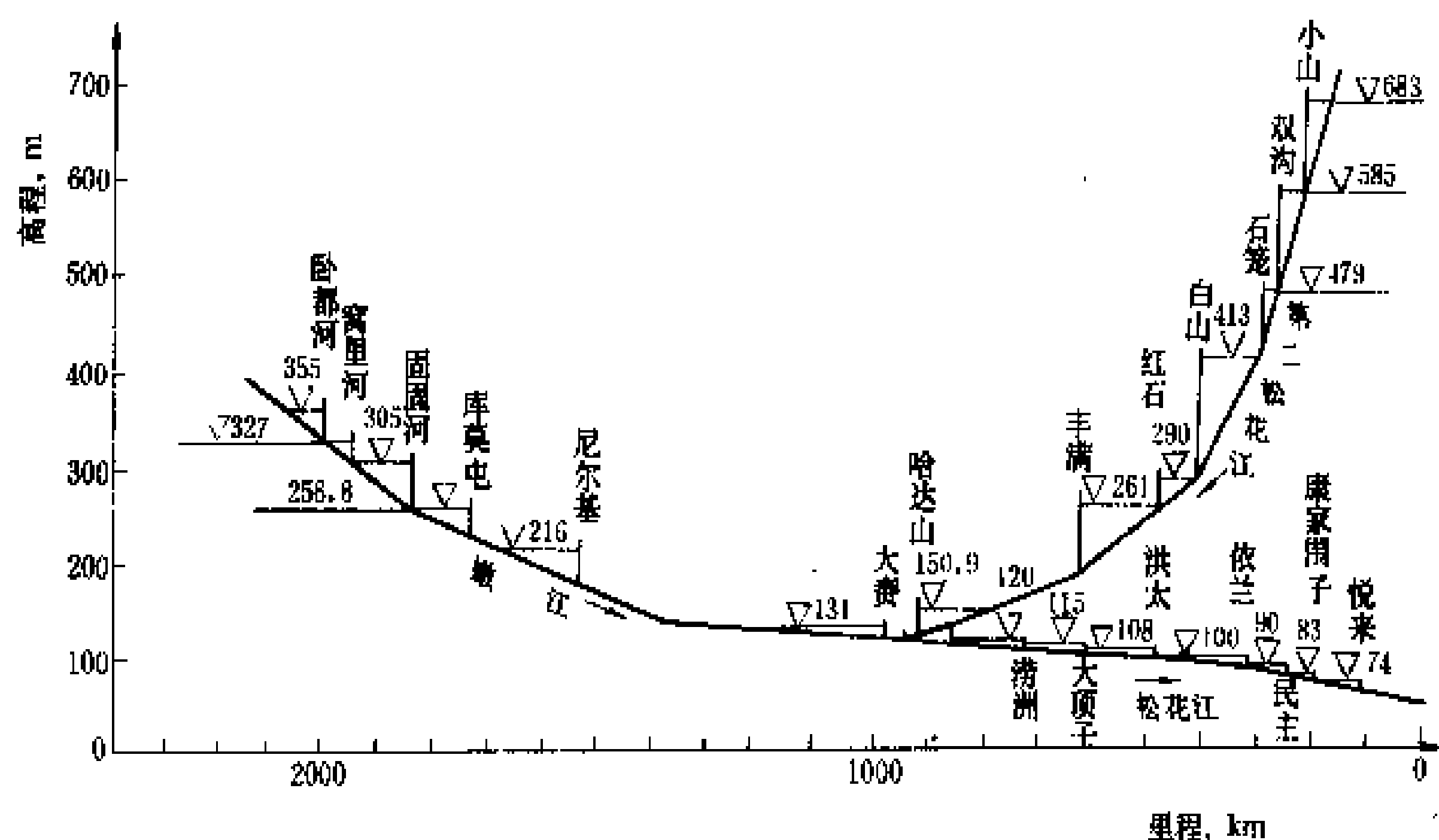
决定死水位还受到如下因素的制约:①综合利用部门的最低水位要求,如水库上游航道最小水深的要求。②水库泥沙淤积对最低死水位的限制。③由于死水位过低而引起的闸门和起重设备制造的困难。④环保的要求和限制。

与水库最优死水位相应的消落深度，一般为水库壅水高度的 20%~40%。负有梯级或跨流域补偿调节任务的水电站，其消落深度较大。调节性能较差的水电站，消落深度较小。

(伍宏中)

Songhua jiang shuidian guihua

松花江水电规划 (hydropower development planning of Songhua river) 根据松辽水利委员会 1991 年编制的《松花江流域规划报告》，在松花江、嫩江、第二松花江布置有卧都河、窝里河、固固河、库莫屯、尼尔基、大赉（以上在嫩江）、松山、小山、双沟、石笼、白山、红石、丰满、哈达山（以上在第二松花江）、涝洲、大顶子、洪太、依兰、民主、康家围子、悦来（以上在松花江）共 21 级水电站。梯级水电站共装机 4150.4 MW，平均年发电量合计为 91.55 亿 kW·h。梯级布置见图。



松花江梯级水电站布置图

松花江是黑龙江的一大支流，有两源，西源嫩江发源于大兴安岭伊勒呼里山，南源第二松花江发源于长白山天池。两江在三岔河汇合后始称松花江，东流至同江注入黑龙江。嫩江河长 1370 km，第二松花江河长 958 km，松花江河长 939 km，流域面积 55.68 万 km²。从河长和流域面积看，嫩江是松花江的干流河源，而第二松花江属支流。

松花江各河段的开发任务不同。①嫩江上游，即库莫屯以上河段，属山区性河流，发电是主要开发任务。规划布置卧都河、窝里河、固固河、库莫屯 4 级水电站，共利用水头 125 m，总库容 137 亿 m³，共装机 358.4 MW。其中以固固河的地形地质条件较好，可进行多年调节。因距用电中心较远，淹没损失较大，至今尚未开发。②嫩江中下游由山区逐渐流向丘陵，到齐齐哈尔市

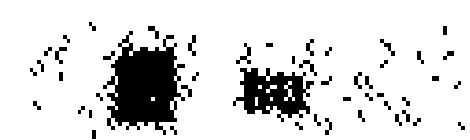
以下为平原区，该区是松花江流域工农业发达地区，要求嫩江供水以满足工农业发展要求，并要求调节洪水，提高防洪标准。规划在这河段设置尼尔基和大赉两级水利枢纽。尼尔基枢纽总库容为 82.2 亿 m³，其中防洪库容 24.64 亿 m³，可使齐齐哈尔市防洪标准由五十年一遇提高到百年一遇。农田防洪标准由二十年一遇提高到五十年一遇。另可为工农业提供水量 74 亿 m³/a。大赉枢纽的建设条件复杂，规划作为远景开发项目。③第二松花江丰满水电站以上河段穿行于长白山区，水量丰富，落差集中，是中国东北地区水能资源开发条件最好的河段。开发任务以发电为主，兼顾防洪。在本河段布置 7 级枢纽，共装机 2934 MW。其中白山、红石、丰满 3 座电站已建成，装机 2424 MW。处于最上游的松山枢纽为一引水枢纽，把第二松花江的源流漫江的水量通过水库调节用长 12.6 km 的引水洞引到支流松江河，集两河的水量在一起由建于松江河上小山、双沟、石笼 3 级水电站发电，共装机 510 MW。支流松江河在白山水电站上游汇入干流。经白山、丰满水库调节可将百年一遇以下洪水控泄为 5500 m³/s 出库。因丰满下游河段堤防断面单薄，实际抗洪能力仅约二十年一遇洪水。规划增强堤防，直到能抗御五十年一遇洪水。④丰满以下河段的开发任务是提高供水能力。规划布置哈达山水利枢纽，总库容 42.4 亿 m³，其中调节库容 33.5 亿 m³。经其调节可多提供水量 81 亿 m³/a。另为协调丰满水电站发电与下游供水之间的矛盾，要建马家反调节水库。⑤松花江干流的开发任务是渠化河道以满足通航要求，设置了 7 级航运枢纽，见图。

(曹学敏)

Sulian shuinneng ziyuan

苏联水能资源 (hydropower resources of USSR) 指苏联河川的水能资源，理论蕴藏量为 39420 亿 kW·h/a，技术可开发资源有 14200 亿 kW·h/a，经济可开发资源有 10950 亿 kW·h/a，各共和国的水能资源见表。1991 年已建水电站的装机容量 63560 MW，平均年发电量 2243 亿 kW·h/a，占技术可开发资源的 15.8%。

俄罗斯的经济可开发资源为 8520 亿 kW·h/a，



占苏联的 77.8%。其中,亚洲境内的部分占俄罗斯的 84.6%,主要有叶尼塞河、勒拿河、鄂毕河和黑龙江,欧洲境内的部分仅占 15.4%,主要有伏尔加河干支流和北高加索地区。俄罗斯水能资源分布与其地区经济发展不相适应,经济发达地区在欧洲,而水能资源主要分布在经济不发达的亚洲。俄罗斯到 1991 年已建水电站的装机容量为 4257.1 万 kW,年发电量 1670 亿 kW·h,分别占苏联的 66.1%和 73.9%。

其他各共和国中,小亚细亚 5 国共有经济可开发资源 1727 亿 kW·h/a,占苏联的 15.8%。塔吉克国土面积 14.31 万 km²,经济可开发资源 850 亿 kW·h/a,主要有瓦赫什河。吉尔吉斯经济可开发资源 480 亿

kW·h/a,主要有纳伦河。哈萨克经济可开发资源 270 亿 kW·h/a,主要有额尔齐斯河。乌兹别克经济可开发资源 110 亿 kW·h/a,主要有契尔契克河。

欧洲境内 9 国共有经济可开发资源 698 亿 kW·h/a,占苏联的 6.4%。格鲁吉亚经济可开发资源 320 亿 kW·h/a,有英古里河。乌克兰经济可开发资源 170 亿 kW·h/a,有第聂伯河。

苏联的海岸线长,潮汐的潮差达 7~13.5m,所以潮汐能资源丰富,技术可开发资源约为 3000 亿 kW·h/a,占世界首位。研究中的大型潮汐电站有位于白海的美晋湾潮汐电站和位于鄂霍次克海的图古尔湾潮汐电站,装机容量分别为 1500 万 kW 和 800 万 kW。

苏联各共和国的水能资源

共和国名称	国土面积 (万 km²)	1990 年人口 (万人)	理论蕴藏量 (亿 kW·h/a)	技术可开发资源		经济可开发资源 (亿 kW·h/a)	每 km² 技术可开发 资源(万 kW·h/a)
				(万 kW)	(亿 kW·h/a)		
苏联	2240.3	28862	39420	31574	14200	10950	6.3
俄罗斯	1707.5	14804	28960	23078	10754	8520	6.3
亚洲境内	1274.0	4314	24950	18644	8947	7210	7.0
欧洲境内	433.5	10490	4010	4434	1807	1310	4.2
哈萨克	271.7	1669	1986	1151	470	270	1.7
乌克兰	60.4	5184	447	782	173	170	2.9
土库曼	48.8	362	239	95	50	17	1.0
乌兹别克	44.7	2032	885	342	174	110	3.9
白俄罗斯	20.8	1026	76	75	21	9	1.0
吉尔吉斯	19.8	437	1425	1135	498	480	25.2
塔吉克	14.3	525	2996	3248	1431	850	100.1
阿塞拜疆	8.7	713	435	228	86	70	9.9
格鲁吉亚	7.0	546	1596	948	410	320	58.6
立陶宛	6.5	372	54	115	23	22	3.5
拉脱维亚	6.4	269	72	200	41	39	6.4
爱沙尼亚	4.5	158	14	1	0.5	0.5	0.1
摩尔多瓦	3.4	436	21	29	7	7	2.1
亚美尼亚	3.0	329	218	147	61	60	20.3

注:1. 资料来源:Гидроэнергетические Ресурсы СССР,1967;Народное Жозяйство СССР, 1990。

2. 表中个别栏的苏联数据与各国数据之和在尾数上原资料有误差。

(高又生)

suxing lixue

塑性力学 (plasticity) 研究物体超过弹性极限后所产生的永久变形和作用力之间的关系以及物体内部应力和应变的分布规律,是力学的一个分支学科。塑性力学所考虑的永久变形只与应力和应变的历史有关,不随时间变化。在工程实践中,塑性力学理论用于研究如何发挥材料强度的潜力,如何利用材料的塑性性质,以便合理选材和制定加工成型工艺等。塑性力学理论还用于计算残余应力。

塑性变形的的基本规律 人们对塑性变形基本规律

的认识来自实验。从实验找出应力超出弹性极限后材料的特性,将这些特性进行归纳并提出合理的假设和简化模型,确定应力超过弹性极限后材料的本构关系,从而建立塑性力学的基本方程。解出这些方程,便可得到不同塑性状态下物体内的应力和应变。

(1)屈服条件。是材料处于弹性阶段还是处于塑性阶段的判据。屈服条件是屈服极限概念在复杂应力状态下的推广,它的数学表达式是

$$f(\sigma_0, \epsilon_0^p, k) = 0 \tag{1}$$

其中 σ_0 是应力张量; ϵ_0^p 是塑性应变张量; k 是塑性内变

量(例如它可以是塑性功、塑性扩容、等效塑性应变等)。满足式(1)的状态是塑性状态, $f < 0$ 的状态是弹性状态。

(2)流动法则。塑性变形增量可用塑性势的梯度表示

$$d\epsilon_{ij} d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2)$$

$g(\sigma_{ij})$ 称为塑性势函数, $d\lambda$ 是一个非负的因子。取屈服函数为塑性势时, 即 $f \equiv g$, 这时称为关联的塑性流动, 也称为正交的流动法则。当屈服函数与塑性势函数不同时, 即 $f \neq g$, 这时称为非关联的塑性流动。

(3)塑性本构方程。根据式(2)和其他一些理论假设, 可导出材料超过弹性极限后的本构方程为

$$d\epsilon_{ij} = C_{ijkl} d\sigma_{kl} + h \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} d\sigma_{kl} \quad (3)$$

式中 C_{ijkl} 是材料的弹性常数; h 是硬化函数, 用它可将流动法则中的 $d\lambda$ 和 ∂f 用下式联系起来

$$d\lambda = h \partial f \quad (4)$$

反映塑性应力-应变关系的本构方程[式(3)]是以增量形式给出的, 增量形式可以反映出塑性力学中变形的历程, 反映塑性变形的本质。塑性力学中还有用全量应力和全量应变表达弹塑性材料本构关系的塑性全量理论, 数学表达式比较简单, 可用于解决简单加载或比例加载条件下的实际问题。

塑性力学问题的求解 解题所使用的平衡方程、几何方程(即应变和位移的关系)以及力和位移的边界条件都和弹性力学中使用的相同, 但在物理关系上则应以塑性本构方程代替弹性力学中的广义胡克定律(见弹性力学)。利用平衡方程、几何方程、物理关系和所有边界条件可以求得超过屈服极限后的应力和应变分布以及内力和外载荷之间的关系。但是塑性力学的本构关系是非线性的, 在具体计算时遇到一些数学上的困难, 因此在塑性力学中还要根据所研究问题的具体情况, 进行简化, 找出解决方法。用有限元方法可以成功地求解塑性力学问题。

塑性力学用于岩石类材料时, 应考虑塑性体积应变以及材料的各向异性、非均匀性、弹塑性耦合、应变软化的非稳定材料和工程的非稳定性问题。

(殷有泉)

suirj shuiwen guocheng

随机水文过程 (stochastic hydrological process)

水文要素值随时间变化有时序的一组随机变量。例如某一河流断面上的水位或流量循时序变化过程或某河段上的水位或流量沿程变化过程。常用的随机水文过程是在离散的时间点上取值的, 又称为

水文时间系列, 如年、月流量系列。在过去时间内观测到的水文系列, 是该随机水文过程的一个样本。随机水文过程在未来可能出现的情况, 只能在特定条件下, 通过以往观测的样本对它的统计特性作出推断。

随机过程的统计特性可用某些特定的统计特征值来表示, 如各时刻的随机变量的期望值与方差, 不同时刻的随机变量之间的协方差等。随机过程的统计特性如不随时程而变, 称为平稳随机过程, 否则该随机过程是非平稳的。在不受人为因素影响的自然条件下, 以年为时间单位的水文时间系列, 如年径流量系列等, 可视为平稳的; 以较短时段为时间单位的水文时间系列, 如月、日流量系列, 则为非平稳的。

用概率和统计理论来分析水文时间系列的主要目的是建立能反映所论随机水文过程的主要特征的数学模型。建立这类随机水文模型时, 由于研讨对象不同, 采用模型的结构有较大的差别。如果过程相邻值之间无相关联系, 即过程是独立的, 其数学模型可为

$$X_t = \mu + \sigma \epsilon_t$$

式中 μ, σ 是 X_t 的均值和均方差; ϵ_t 是均值为零方差为1的随机数。最简单的相依模型为

$$X_t = aX_{t-1} + b\epsilon_t$$

式中 a, b 为待定参数; ϵ_t 的意义同前。还有一些描述随机水文过程的模型, 如自回归滑动平均模型、解集模型、散粒噪声模型、多变量模型等。建立模型的主要步骤是: 选择模型类型、估计参数、检验拟合优度、分析不确定性等。建立的模型应能模拟历史系列的主要统计特征。

在制定流域系统的规划设计和运用方案时, 多依据历史水文系列, 通过模拟分析途径来预估各方案实施后可能出现的状况。历史系列一般不长, 反映的变动情况较少, 丰枯组合不多。有些较复杂的问题, 用此种办法不易得出完满的结果。例如, 多年调节水库的坝前水位及库区淹没水位的频率分析、水库群下游河道防洪风险分析、规划水电站各种兴利指标的可靠度分析、多年调节综合利用水库的合理调度等, 都是常规方法不易很好解决的问题。计算机技术的发展, 为随机水文模型的应用创造了良好的条件。利用随机水文模型可生成必要数量的随机水文系列, 以之作为流域系列的输入, 通过随机模拟的途径, 可对上述类型的问题求得解答。目前这方面的工作还开展得不太普遍, 其原因是某些随机水文模型的性能还不太令人满意。另外, 水文资料的不足, 更是所有概率统计方法面临的共同问题。

(廖松)

suidong kaiwa

隧洞开挖 (tunnelling; tunnel excavation)

将地下岩土破碎、清除、并对不稳定围岩支护加固,形成具有封闭断面通道的施工过程。隧洞开挖需根据不同围岩(即隧洞周围一定范围内对隧洞稳定有影响的岩体)的地质条件采用不同掘进手段。隧洞的开挖方法主要有钻孔爆破法、掘进机开挖法、盾构法和顶管法等。

钻孔爆破法 隧洞开挖中最常用的开挖方法。根据围岩地质条件、隧洞形状、断面大小、洞身长短和施工进度要求,选用不同方法进行钻孔(即用钻孔机械在岩层中凿出圆孔)、爆破(即用炸药填入钻孔引爆破碎岩石)、出渣(即将炸碎的石渣运至一定地点堆存)、支护(即用支架或其他方法支撑隧洞开挖面防止围岩塌落)等施工措施,逐段推进成洞的施工工艺。

(1)掘进方法。常用的隧洞掘进方法有全断面法、台阶法、导洞辐射法、支撑拱法、核心支撑法和新奥法

①全断面法。适用于地质构造简单、围岩结构基本稳定,隧洞断面不太大的中厚层坚硬岩体的开挖。一般造价低、进度快,与隧洞衬砌施工的干扰较小。②台阶法。有正台阶和反台阶,长台阶和短台阶。通常大、中断面隧洞开挖多用正台阶和长台阶,机械化程度较低的隧洞开挖多用反台阶和短

台阶,其优点可以上、下台阶同时作业流水出渣(图1)。③导洞辐射法。分中心导洞辐射和下导洞辐射,先开挖导洞,然后用扇形辐射孔扩大断面,适用于机械化程度较低时开挖大断面隧洞(图2);④支撑拱法。上

⑤核心支撑法。隧洞跨度大且围岩不稳定,或边墙稳定性差不能承受顶拱荷载的隧洞开挖中应用,先开挖两侧导洞,逐步扩大后

衬砌边墙,顶留核心岩体作支柱,待顶拱开挖衬砌后再挖除岩体。这种方法开挖成本高,工期长,但在地质复杂的软弱岩层中使用比较安全(图4,

I~X表示施工顺序)。

⑥新奥法。利用围岩固有承载能力及时锚喷支护掘进的隧洞设计施工方法。

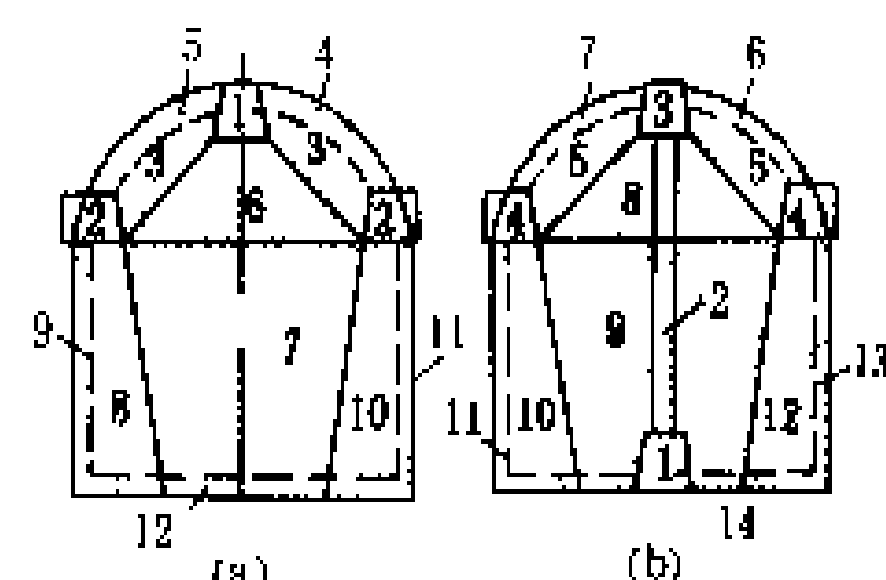


图3 支撑拱法

(a) 上导洞开挖;

(b) 上、下导洞开挖

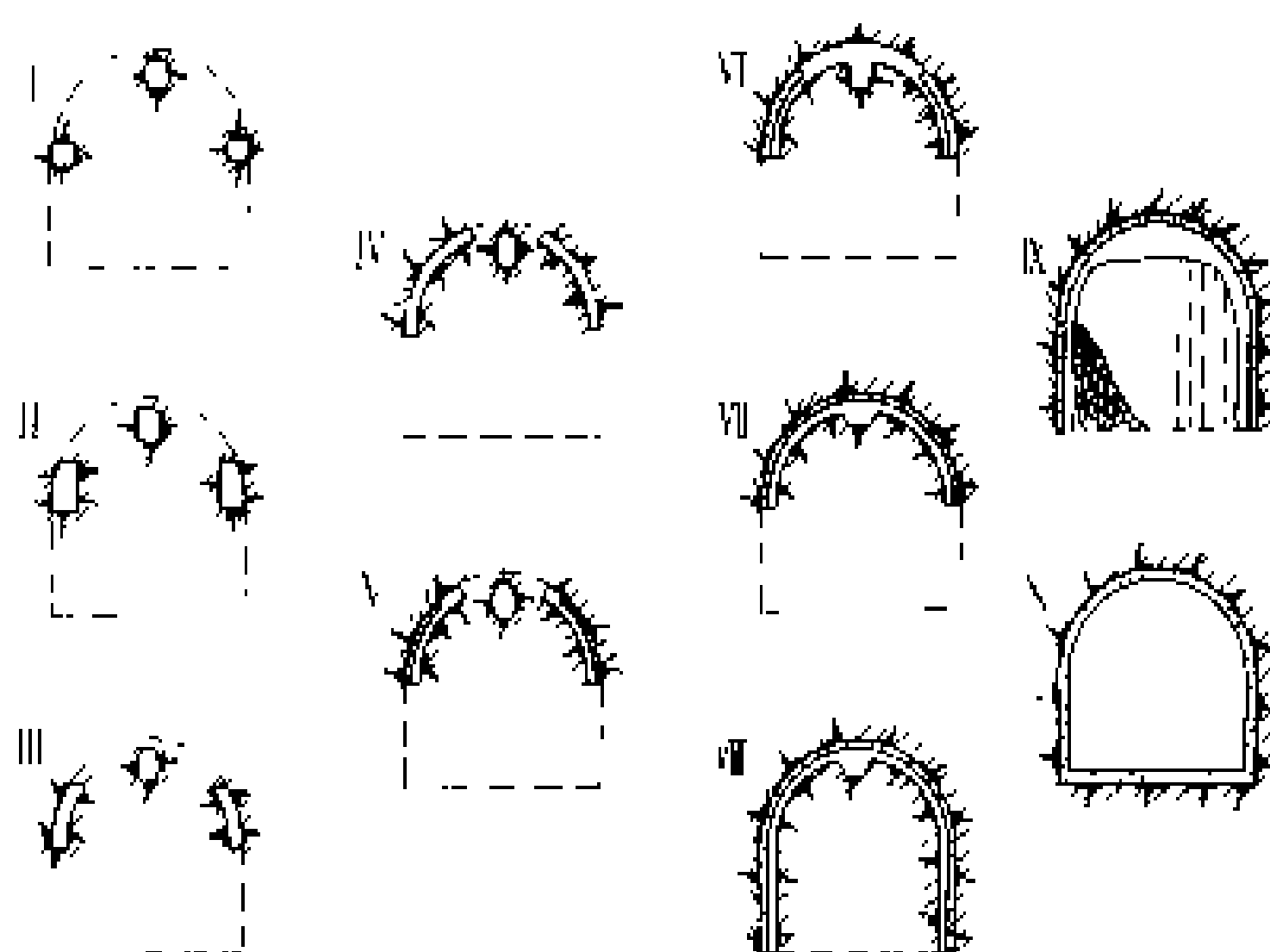


图4 核心支撑法

为缩短隧洞施工期,在长洞施工或隧洞工期控制枢纽工程总工期时,常需根据地形、地质条件在主洞侧面设置施工支洞以增加施工工作面,缩短施工总工期。支洞断面形状有圆形、矩形(用于竖井支洞)和拱形、梯形(用于平、斜支洞),断面尺寸根据运输设备、出渣强度、支护类型、管线及行人宽度选定。

(2)钻孔布置。一般采用中心掏槽(即在开挖面中心部位布置的装药或不装药炮孔),周边用预裂爆破或光面爆破控制开挖轮廓,其余钻孔为使岩体破碎的崩落孔。常用的掏槽方式有平行直孔掏槽、扇形掏槽、楔形或锥形掏槽四种。崩落孔则为抵抗线垂直于临空面的爆破直孔,在掏槽孔爆开一个孔洞后起到将岩体向孔洞继续崩落的作用。隧洞开挖按设计布置钻孔装药起爆,一般水工隧洞不允许欠挖,少量欠挖用机械铲除,并尽量减少超挖。

(3)施工支护。隧洞开挖中遭遇不良地质地段、洞室交叉地段以及围岩容易失稳地段时,要根据地质条件、洞室结构、断面尺寸、开挖方法和围岩暴露时间进行支护(见地下工程施工支护)。

(4)隧洞出渣。隧洞出渣常用无轨运输或有轨运输。①无轨运输多用于断面较大的隧洞,用装载机或单

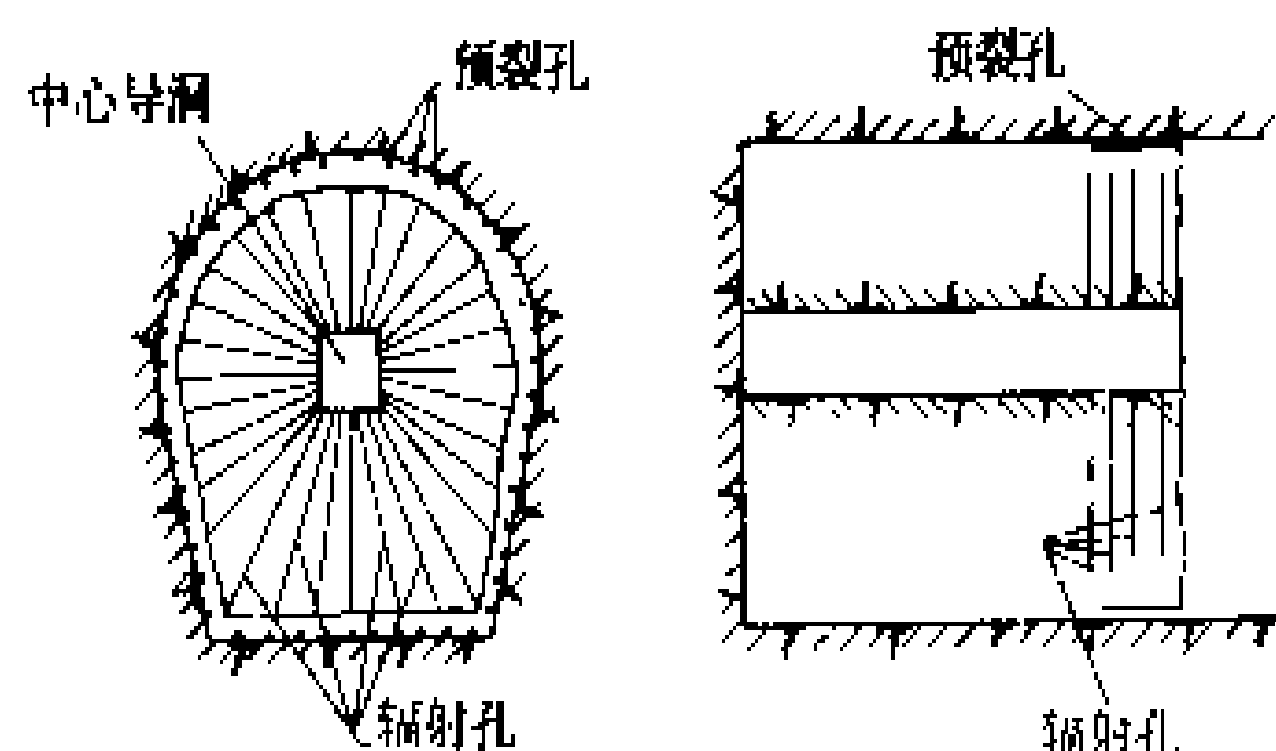


图2 导洞辐射法

导洞领先,然后开挖两侧顶拱,在局部顶拱衬砌后再开挖中间顶拱并封拱,根据围岩稳定情况扩挖其余部分成洞,适用于围岩不够稳定的大断面隧洞开挖(图3,图中1~14表示施工顺序,虚线为混凝土衬砌断面)。



斗挖掘机装渣，推土机集渣，自卸汽车运输出渣。在运距不大时，也有用装载机直接运输出渣。②有轨运输多用于中小断面隧洞，装岩机装渣，电机车、内燃机车或蓄电池机车拖斗车或梭式矿车运输出渣。在短隧洞开挖量不大的小工程且无机车设备时，也还用人力推斗车运输出渣。

掘进机开挖法 用隧洞专用的掘进机进行圆形断面的隧洞开挖方法。

盾构法 在松软地层中用盾构进行圆形断面中、小隧洞开挖的施工方法。盾构是用钢构件制成的盾和构架，既可用以掘进，又可用以安装支护砌块，并起到保护作用。现代盾构的前部为装置开挖设备的切口金属环，中部装置推进设备的支承环，尾部为保护砌块安

装的钢盾。施工时在前部开挖地层，同时尾部拼装预制混凝土砌块支护，然后用千斤顶顶住已拼装好的砌块支护将盾构推进，如此循环交替逐步掘进。盾构按用途分为无压盾构和压气盾构两类，后者是在盾构前部造成压缩空气封闭室，用以平衡工作面上的土压力和地下水压力。

顶管法 用钢管或预制的钢筋混凝土管形或箱形结构，前端设刃，后端用千斤顶将管身顶入土中就位，用人力或机械清除管内土方，是松软地层小型隧洞或涵管的特殊开挖方法，适用于修建穿越城市建筑物、江河河底及交通线下面的土基础或淤泥、流沙地层的隧洞。

(王守道)

tanxing lixue

弹性力学 (elasticity) 研究弹性物体在外力和其他外界因素作用下产生变形和内力的学科,是力学的重要分支。弹性力学又称弹性理论,是材料力学、结构力学、塑性力学和某些交叉学科的基础,广泛应用于土木、机械、电力、化工和航天等工程领域。弹性力学所依据的基本规律有3个:变形连续规律,应力-应变关系和运动(或平衡)规律。

简史 英国的R. 胡克(R. Hooke)于1678年和法国的E. 马略特(E. Mariotte)于1680年分别独立地提出了弹性体变形与外力成正比的定律,后被称为胡克定律。在19世纪20年代法国的C. -L. -M. -H. 纳维(C. -L. -M. -H. Navier)和A. -L. 柯西(A. -L. Cauchy)基本上建立了弹性力学的数学理论。从20世纪20年代起弹性力学进入一个新的发展时期,在发展经典理论的同时,广泛地探讨了许多复杂的问题,出现了各向异性和非均匀体的理论、非线性弹性理论、热弹性理论、气动弹性力学和水弹性理论以及粘弹性理论等。

基本规律 有以下几个方面。

(1) 变形连续规律。弹性力学考虑到物体的变形,但只限于物体在变形过程中不产生新的不连续面的情况。反映变形连续规律的数学方程有两类:几何方程和位移边界条件。几何方程反映应变和位移的联系,它的力学含义是应变完全由连续的位移所引起。在笛卡尔(R. Descartes)坐标系中,几何方程为

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), i, j=1, 2, 3 \quad (1)$$

式中 x_i 为坐标系的坐标; u_i 为与 x_i 相应的位移分量; ϵ_{ij} 为应变分量。若边界上的位移 \bar{u}_i 为已知量,则边界条件为

$$u_i = \bar{u}_i, i=1, 2, 3 \quad (2)$$

式中 u_i 为物体的位移。

(2) 应力-应变关系。弹性体中一点的应力状态和应变状态之间存在着一定的联系,这种联系与如何达到这种应力状态和应变状态的过程无关,即应力和应变之间存在一一对应关系。若应力和应变呈线性关系,这个关系便叫广义胡克定律。各向同性材料的广义胡克定律有两种常用的数学形式

$$\sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2G \epsilon_{ij} \quad (3a)$$

和

$$\epsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (3b)$$

式中 σ_{ij} 为应力分量; δ_{ij} 为克朗内克(Kronecker)记号;重复出现下标表示对1,2,3求和; λ 和 G 为拉梅常数, G 又称剪切模量; E 为杨氏(T. Young)模量(或弹性

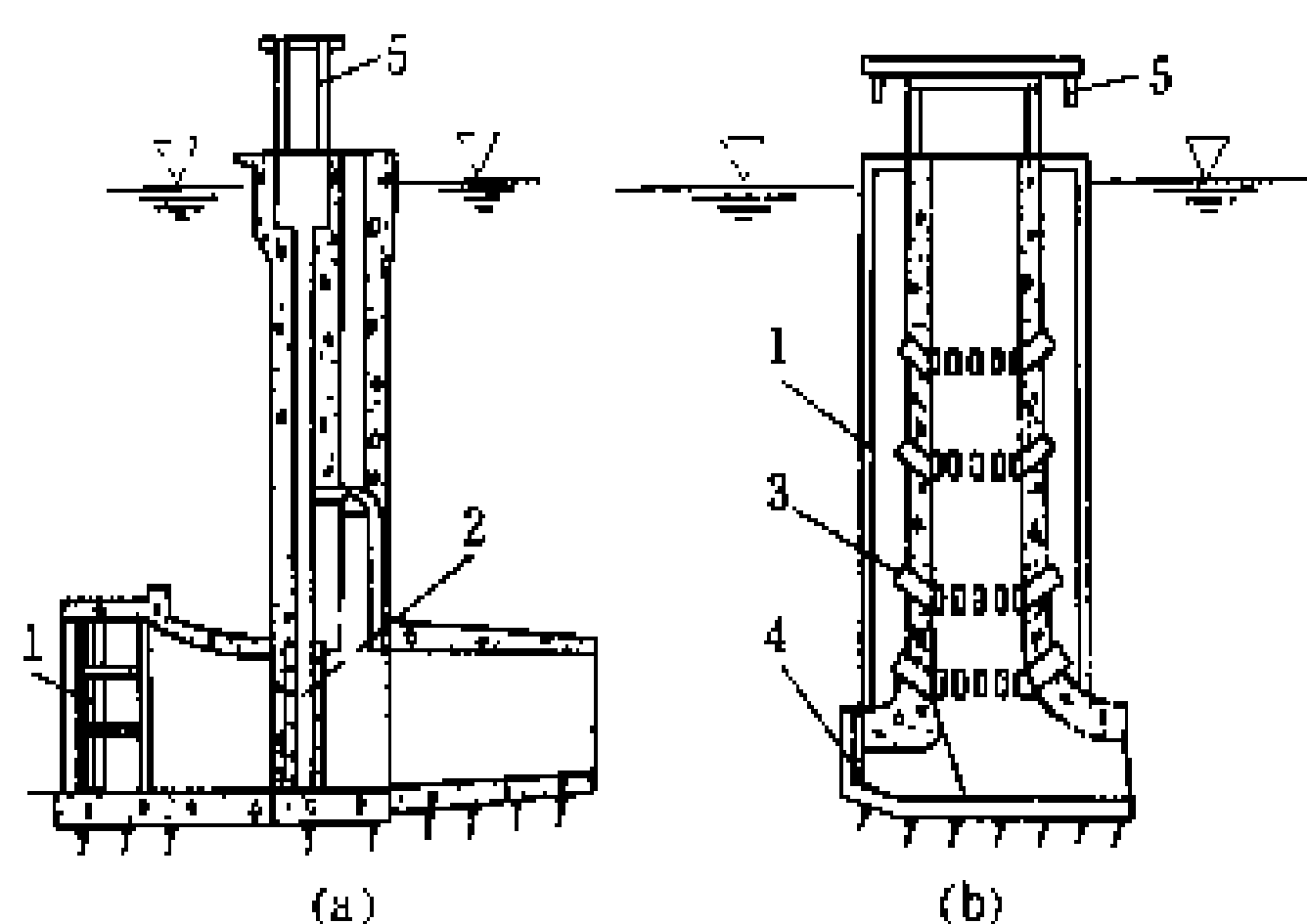
T

tashi jinshui kou

塔式进水口 (tower intake) 独立于库岸和坝体以外、具有塔型结构的深孔式进水口。这种进水口在平面上呈圆形或正多边形,可采用径向取水方式或单面取水方式,见图所示。径向取水方式将环绕塔身的全部周边用支墩分隔,布置成若干个喇叭口,充分利用塔身周边长度作取水前缘,以引用较大的流量。各支墩间设置拦污栅和检修闸门。水历经各个喇叭口径向流入塔中的竖井汇集之后,再折转向下进入水电站的有压引水道。塔中的竖井一般安装圆筒式闸门作为事故闸门。塔顶位于最高水位以上,作为启闭、清污设备的工作平台,可用交通桥与库岸或坝体相连,也可利用船只往来。

当受库岸、坝体影响,不能环塔身周边均匀取水时,可采用单面取水方式,仅在塔身一侧设置单孔或并列多孔的喇叭口,水流流入塔内汇集后进入有压引水道。这种塔式进水口的塔身剖面多为矩形。

塔式进水口可在塔身不同高程处设置多层取水孔口,有利于在多泥沙、多污物、多冰凌的河流上分层取水。在大型水库的蓄水初期,可利用底层的取水孔口在低水位条件下提前引水发电。



塔式进水口

(a) 单面取水; (b) 径向取水

1 拦污栅; 2—闸门槽; 3—取水孔口; 4—底孔;
5—启闭机

(丁志华)



模量)； ν 为泊松(S.-D.Poisson)比。 λ ， G ， E 和 ν 这4个常数之间存在下列关系

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\ G &= \frac{E}{2(1+\nu)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(3a)适用于已知应变求应力的问题，式(3b)适用于已知应力求应变的问题。此外，还有其他非线性的应力应变关系。

(3) 运动(或平衡)规律。处于运动(或平衡)状态的物体，其中任一部分都遵守力学中的运动(或平衡)规律。反映这个规律的数学方程有两类：运动(或平衡)微分方程和载荷边界条件。在笛卡儿坐标系中，运动(或平衡)微分方程为

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad i, j=1, 2, 3 \quad (5)$$

式中 t 为时间； ρ 为材料密度； f_i 为作用在物体上的体力(外载荷的体积密度)载荷分量。方程(5)实质上是物体中隔离出来的一个微小平行六面体的运动方程。在平衡问题中，惯性力 $\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}$ 很小，忽略这些惯性力，便得到弹性力学中的平衡微分方程。如果考虑物体一部分边界上有给定的外载荷，则根据作用力和反作用力大小相等方向相反的原理，其边界条件为

$$\sigma_{ij} n_j = \bar{p}_i, \quad i, j=1, 2, 3 \quad (6)$$

式中 n_j 为边界外法线方向的方向余弦； \bar{p}_i 为给定的边界载荷分量。

弹性力学的问题和求解 弹性力学的平衡问题的解法由3个基本规律给出。而弹性力学的动力学问题，除此之外还需说明物体的初始状态，即

$$\text{当 } t=t_0 \text{ 时, } u_i=u_{i0}, \quad \frac{\partial u_i}{\partial t}=v_{i0}, \quad i=1, 2, 3 \quad (7)$$

式中 t_0 为初始时间； u_{i0} 和 v_{i0} 分别为物体在初始时刻的位移和速度，它们都是给定的函数。求解一个弹性力学问题，就是设法确定弹性体中各点的位移、应变和应力共15个函数。即根据几何方程(1)，应力-应变关系(3a)或(3b)，运动(或平衡)方程(5)，边界条件(2)和(6)以及动力学问题中的初始条件(7)，解出 u_i ， ϵ_{ij} 和 σ_{ij} 等15个函数。常用的求解方法有解析法和数值法。解析法包括分离变量法和弹性力学的复变函数方法。数值法中使用最多的是能量法，包括古典的瑞利-里茨(Rayleigh-Ritz)法和当前广泛使用的有限元法、差分法、边界元法和加权残数法。

(殷有泉)

tiduan baopo

梯段爆破 (bench blasting) 将开挖面造成台阶以一排或多排深孔爆破进行石方开挖流水作业的爆破技术。梯段爆破适用于采石场或矿山开采，坝基、路基、溢洪道开挖，大直径地下洞室的台阶法掘进。

梯段爆破采用深孔台阶分段起爆，一般单位耗药量较小，与洞室爆破比较二次解炮工作量少，对保留岩体的影响小，爆破以后壁面平整，边坡稳定，易于采用综合机械化施工。

梯段爆破的要素与岩层性质、机械性能和炸药种类有关。①炮孔布置，有垂直孔和倾斜孔两种，一般倾斜孔优于垂直孔，但岩层破碎，容易堵孔卡钻时也常采用垂直孔。②钻孔直径，与采用梯段高度有关。目前各国趋向大孔径钻孔，通常用150~310 mm。③最小抵抗线长，与钻孔直径有关。最小抵抗线过大，将使爆破效果恶化，炸药量增加，反之，不能充分利用炸药能量，增加炮孔数量，费用相对加大。④钻孔超深。为降低装药中心位置，克服梯段底部阻力，避免或减少留底炮根(即爆破后残留在底部岩体中的钻孔)，使孔底高程满足设计要求，减少给下一梯段造成不良影响，通常超深0.1~0.2倍梯段高。⑤梯段高度、宽度和工作面长度，一般梯段高度小于15 m，当挖掘设备斗容大于8 m³，高度有到20 m。梯段宽度为爆破后的爆堆宽度加运输线宽度。工作面长度以能满足石方开挖进度要求并充分发挥机械设备的工作效率为前提。⑥起爆顺序。梯段爆破通常采用毫秒爆破，各炮孔间起爆网络的联接形式，决定梯段起爆顺序，有排间顺序起爆、分区顺序起爆以及奇偶式、波浪式、楔形、梯形、梅花形等不同连接形式的顺序起爆。

(王守道)

ti ji shuidianzhan

梯级水电站 (cascade hydropower station)

分布在一条河流的上下游有水流联系的水电站群。它们在河流平面图和纵断面图上的位置见图1和

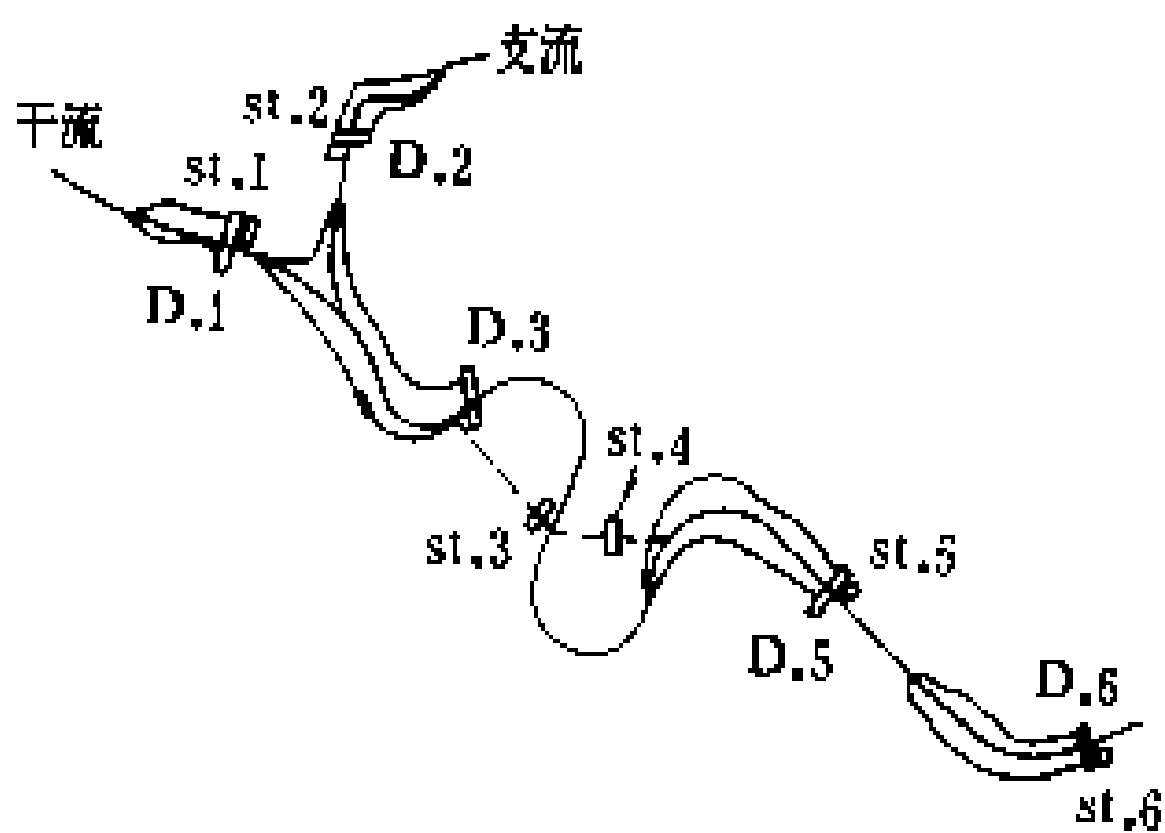


图1 梯级水电站平面位置图

D—坝址；st—厂址

图 2。梯级中的各级水电站可以是坝式水电站、引水式水电站或混合式水电站。若单独开发,各类水电站有各自的优缺点,组成梯级水电站后,则可取长补短,获得梯级效益,如提高资源的利用率、协调水资源综合利用之间的矛盾、缩短总体工期、减少总投资等。

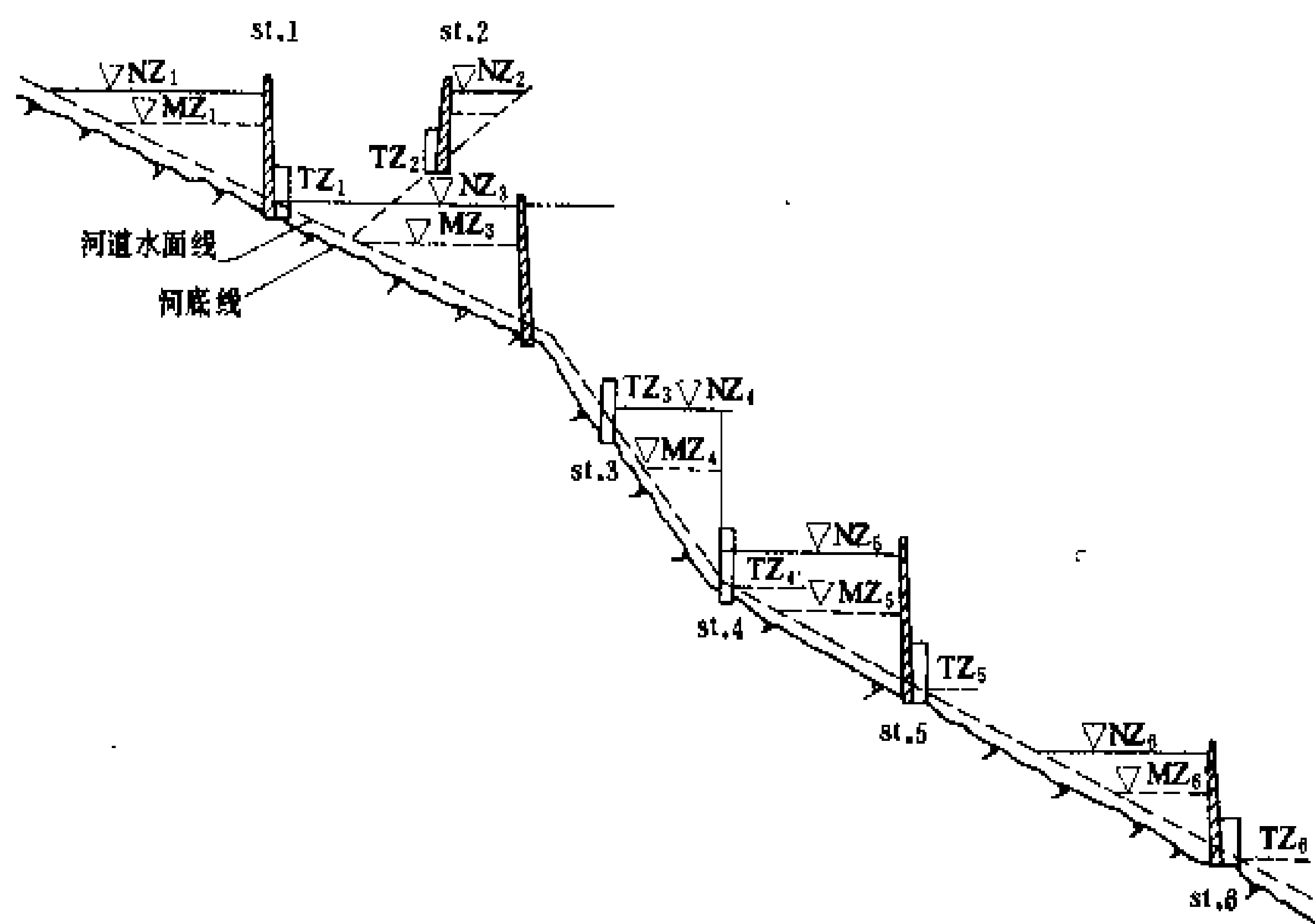


图 2 梯级水电站河流纵断面图

▽NZ—正常蓄水位; ▽MZ—死水位; TZ—电站出口处河道水位; st—厂址

梯级衔接 上级水电站的尾水位与下级水电站正常蓄水位之间的连接方式。梯级衔接是梯级水电站布置中的一个重要问题,它关系到能否充分利用全河流的水能资源,也关系到全河航运。梯级衔接有 3 种方式。

(1) 齐平衔接。上级水电站尾水位与下级水电站正常蓄水位齐平。当下级水电站的库水位为正常蓄水位时,本级电站开发河段的水头,得以充分利用,也不减少上级电站的利用水头。但当下级水电站库水位低于正常蓄水位运行时,两电站间就有一段航道处于天然河道状态,既不利于航运,又损失了一部分可利用的水头。因此,这种方式较适合于下级水电站库水位变化不大的情况。

(2) 重叠衔接。下级水电站正常蓄水位高于上级水电站尾水位。在下级水电站的水库有调节径流任务时,采用这种衔接可能有利。因为,下级水电站调节径流时,库水位常低于正常蓄水位,若为齐平衔接,则上级水电站尾水位以下,有部分航道常处于天然河道状态,对航运和水头利用都不利。采用重叠衔接可减少或避免这种情况出现。有时,航道要求下级水电站的死水位与上级电站的尾水位齐平,这种情况下上级水电站尾水至下级水电站进水口之间不会出现天然河道状态。这种衔接,上级水电站减少的水头,全部增加到下级水电站,并不损失可利用的水头。当上下两级电站间有支

流汇入,且下级水电站的库水位经常低于正常蓄水位时,采用重叠衔接比采用齐平衔接能更充分利用水能资源。中国南盘江天生桥一级水电站与其上游支流黄泥河的鲁布革水电站之间采用重叠衔接,主要为了天生桥一级水电站提高水头,使南盘江干流来水可以多

发电。天生桥一级水电站和天生桥二级水电站间也采用重叠衔接,则主要是为了增大二级水电站的调节库容。

(3) 不衔接。下级水电站正常蓄水位低于上级水电站尾水位,既损失了可利用的水头,降低河流水能资源的利用率,又不利于航运。但在平原河段,为了减少水库淹没损失,往往采用这种方式。中国黄河上游,为减少淹没损失,在多处河段采用不衔接方式,见黄河上游水电规划。

梯级效益 梯级水电站之间有密切的水流联系,其

中某一级水电站水库的调节作用,可使其下游的所有梯级水电站受益;上下游水库联合调度,可协调解决发电和其他用水要求的矛盾等。

(1) 上游水电站水库调节径流可增大下游所有梯级水电站的保证出力和年发电量。上游水电站水库在汛期蓄水,所蓄水量转移到枯水期利用,下游各级水电站也相应减少汛期通过水量,增加枯水期通过水量,减少汛期弃水,增加枯水期发电量,同时下游的低水头水电站可以避免汛期因水头降低而产生受阻出力或减少受阻容量(见水电站设计水头)。中国雅砻江上规划的两河口水电站,电站本身的保证出力只有 870 MW,但由于它的水库调节,使下游 10 级水电站增加保证出力 3400 MW。

(2) 上下游水库联合调度,可协调发电和其他用水要求的矛盾。如三峡水利枢纽承担电力系统调峰任务,因而出库流量每昼夜很不均匀。为满足航运要求,葛洲坝水利枢纽进行反调节,把不均匀的入库流量调节成均匀的出库流量,使下游水位不陡涨陡落以保证航运。又如龙羊峡水库与刘家峡水库联合调度解决发电与灌溉用水的矛盾。灌溉期,刘家峡多放水,与其下游各级电站在日负荷的基荷区或腰荷区运行,多发电,以满足其下游灌溉用水;而龙羊峡水库少放水,与其下游刘家峡以上的梯级水电站一同少发电量,可在日负荷高峰区运行,把水蓄起来待枯水期利用。非灌期,龙羊峡多

放水多发电,刘家峡少放水少发电,两组水电站群的工作位置相互交换。经过龙羊峡和刘家峡两座大水库联合调度,既充分满足刘家峡水电站下游河段灌溉用水的要求,又使黄河上游的梯级水电站整体按电力系统的要求运行。

(3) 上游水电站水库削减洪峰、蓄存洪量,可提高下游各级水电站防洪标准,减小泄洪设施规模。由于龙羊峡水电站水库的调洪作用,使刘家峡、盐锅峡和八盘峡3座水电站的校核洪水标准分别由五千年一遇、千年一遇和三百年一遇,提高到最大洪水、两千年一遇和千年一遇。

(4) 上游电站水库有时可为下游电站缩短初期蓄水时间。因上游水库的蓄水量可先暂时部分转移到正蓄水的下游水库,使之尽快达到可发电的水位,提前投产运行。

梯级连续开发 梯级水电站的梯级效益随着各级电站的逐级建成而逐渐增长,而每级水电站的施工一般分为3个阶段:首先开挖工程出现高峰,以后是土石方或混凝土工程的高峰,最后是设备安装的高峰。根据这些特点,在适应国民经济发展需要的前提下,连续开发梯级水电站的优点有:①可尽快实现梯级效益;②可优化安排各级水电站的施工进度,施工期互相搭接而施工高峰又互相错开可加速整个梯级水电站的开发进程;③可提高施工设备和施工场地的利用率;④利用上游水库蓄水时机减少下游电站的施工导流流量;⑤可减少施工队伍转移的费用和时间。由于上述优点,梯级连续开发可降低造价、缩短工期、加速实现梯级效益。

梯级开发实例 世界各国普遍重视梯级开发,一般在上游尽可能设置调节性能好的水库,中下游根据综合利用要求及开发条件安排梯级,而其开发顺序则根据经济发展需要并考虑项目的经济性安排。如哥伦比亚(Columbia)河,上游在加拿大,下游在美国,干流长约2000 km,落差808 m,分15级开发。美国于1932~1972年先建11级水电站,共装机1172万kW,总库容207亿m³。流域内有灌区27个,灌溉面积22万ha。自河口到波特兰长185 km河段航深达12.2 m,可通航2.6万t级海轮。下游4级及支流斯内克河4级水电站都建有船闸和鱼梯。1961年1月17日美国和加拿大签订哥伦比亚河条约,按条约加拿大在上游建麦卡(Mica)等3座水库,其中有1座在支流,美国则在支流库特内河上建利贝(Libby)水库,为干流中下游调节水量。由于西北与西南联网,要求哥伦比亚河水电站担负更多调峰任务,美国11座水电站装机扩大到1953万kW。加拿大在干流已建2级电站,装机358万kW。干流两国合计装机2311万kW。又如苏联伏

尔加河处于苏联经济最早开发地区,是一条平原、丘陵型河流。干流全长3700 km,利用落差256 m,规划分9级开发。第二次世界大战前先开发了上游3级(1~3级)水电站,目的是解决与外海的航运联系及向首都莫斯科市的供水供电。1948~1985年又相继开发第4、6、8、7、5级水电站,以发电和改善航运为主,兼顾农业和渔业。第9级尚未开发。已开发的8级水电站共装机860.3万kW。其中规模最大的伏尔加格勒(Волгаград)水电站装机256.3万kW。

中国也是在全河或局部河段统一规划下实施梯级开发。如在中国和朝鲜两国的界河鸭绿江,由两国共同规划,共同建设。规划按7级开发,共装机234.0万kW,年发电量93.4亿kW·h。首先开发了调节性能好的水丰水电站和云峰水电站,现已建成5级,已开发利用全梯级年发电量中的89%(见鸭绿江水电规划)。中国现正在大力开发红水河。原规划按10级水电站开发。据广西壮族自治区用电增长过程及开发条件先建成大化水电站和恶滩水电站,天生桥二级水电站和岩滩水电站已开始发电,正在建设天生桥一级水电站。已、在建电站装机容量总计418万kW,占全梯级的38%。其中天生桥二级水电站采用引水式开发,而天生桥一级水电站以其巨大的调节库容消除了二级引水式水电站无调节径流能力的缺点,并提高其他各级水电站的效益。在待建的龙滩和大藤峡水电站规划设置防洪库容,可提高西江干流和珠江三角洲地区的防洪标准(见红水河水电规划)。长江宜宾—宜昌段的开发任务是:防洪、发电、航运。河段将分5级开发,共装机25425 MW。其中有中国规模最大的水电站——三峡水利枢纽,装机18200 MW。待其建成后将显著提高其下游河段的防洪能力,将向缺乏能源的华中、华东地区供电,并可使万吨级航队直达重庆。其下游已建的葛洲坝水利枢纽,装机2715 MW,将由现在的径流式水电站改变成为三峡水利枢纽进行反调节的枢纽,以协调发电和航运之间的矛盾(见长江宜宾—宜昌段水电规划)。在黄河上游规划分15级或16级开发,共装机14250~14350 MW。在70年代以前先建了刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡等4级水电站,对中国西北地区经济发展起了重要作用,提高了刘家峡以下河段的防洪能力,满足了灌溉的需要。在80年代建成了龙羊峡水电站,在扩展了电源的同时,以其巨大的调节库容与刘家峡水电站联合调度,进一步提高了防洪能力并协调了发电用水和灌溉用水在时空分配上要求不同的矛盾。在建的还有李家峡和大峡水电站。已建和在建水电站的装机规模占全梯级的34%。将来待黑山峡水电站建成后,由龙、刘、黑3库联合调度将更好地协调综合利用之间的矛盾,使发电、灌溉、防洪、防凌各得其所

(见黄河上游水电规划)。

(曹学敏)

tijī shuǐdiǎnzhan jìzhōng kòngzhì

梯级水电站集中控制 (centralized control of cascade hydropower stations)

对梯级中各水电站的运行进行集中监视、控制的技术。梯级水电站一般由不同开发方式、不同库容和不同装机容量的一组水电站串联组成。梯级间除有电力联系外,还有着十分紧密的水力联系,其出力、流量及水头等运行约束关系十分繁杂。只有以整个梯级为对象,并借助于有效的调度监控手段,实行集中控制,才有可能实现整个梯级安全、经济运行的目的。

控制方式 控制方式分远动控制、计算机控制和计算机辅助远方控制等。

(1) 远动控制方式 (Telecontrol Based Supervisory Control, TBSC)。这是一种以远动技术为基础,以“四通”(通信、遥测、遥控、遥调)为主要内容的集中控制方式。远动装置已经发展了两代产品,即布线逻辑型远动装置和微机型远动装置。后者以微机技术为基础,并采用了模块化结构,因此具有容量和功能扩展方便、自诊断及适应用户能力强等优点。它除实现“四通”功能外,还可实现事件分辨、越限报警、画面显示以及打印制表等功能。苏联塔芝梯级、中国猫跳河梯级等的集中控制都采用远动控制方式。

(2) 计算机控制方式 (Computer Based Supervisory Control, CBSC)。它是在控制中心和各梯级水电站分别设置计算机系统和远方终端装置,构成以计算机系统为主体、以数据采集和监控以及经济运行为目的的集中控制方式。由于这种控制方式能充分发挥计算机运算和处理速度快、存贮容量大、实时响应能力强、能对大量的数据及状态进行快速、实时处理等优点,从而使它能实现整个梯级数据采集及处理、事件顺序记录、智能化控制、功率总加、故障录波及电量积算、历史数据存贮、画面显示、打印制表以及经济运行等众多功能。法国罗纳河梯级、加拿大拉格朗德梯级等均属于这种控制方式。

(3) 计算机辅助远动控制方式 (Computer Aided Supervisory Control, CASC)。这是基于在采用远动控制方式的基础上,另设置小型计算机系统,通过小型计算机与远动装置接口以完成原远动控制方式所不能完成的数据处理以及经济运行等功能。日本岩清水系梯级和十胜川水系梯级以及中国浑江梯级等都属于这种控制方式。

主要任务 梯级水电站集中控制的任务如下。

(1) 水文信息的采集、处理及洪水预报。定时或

随时采集全流域的雨量、水位等水文信息,经处理、计算后求得未来时段入库流量、来水时间以及坝前水位,借以制订水库调度和水务管理计划。在洪水期,根据水库蓄留洪水及电站满发过流能力,计算决定泄洪闸门开启的孔数和开度,下泄部分流量,保证水工建筑物的安全和电站运行的经济性。

(2) 数据采集和监控。对梯级水电站的主要设备实现数据采集和监控,包括各水电站机组运行工况的转换、主要断路器投切、高压出线电压水平的监控、主要设备运行参数及状态的巡测和辨识、事故情况下的运行指导和处理等。

(3) 梯级水电站的优化运行。在给定的运行周期(日)内,满足各项运行约束条件下,按梯级水电站获得最大经济效益来决定各水电站的运行方式。它包括:根据系统调度给定的日负荷曲线,按水量、电量平衡原则,分别制订各水电站的日负荷曲线;分别选择最优运行机组台数和台号组合;分别进行并列运行机组最佳负荷分配等。

(4) 河道流量配合控制。当梯级间有航运、灌溉、工业用水等要求时,应相应考虑保持下游河道一定流量。当下游需要流量在水电站发电流量以下时,可用调节水电站的发电量来控制,当所需流量超过水电站发电流量时,则需要在发电量和坝体放水闸门控制之间进行配合。

(5) 与系统调度的通信。向上级调度转发表征整个梯级运行工况的信息以及接受系统调度的控制命令信息。

(王洪运)

Tianhuangping Choushui Xu'nerg Dianzhan

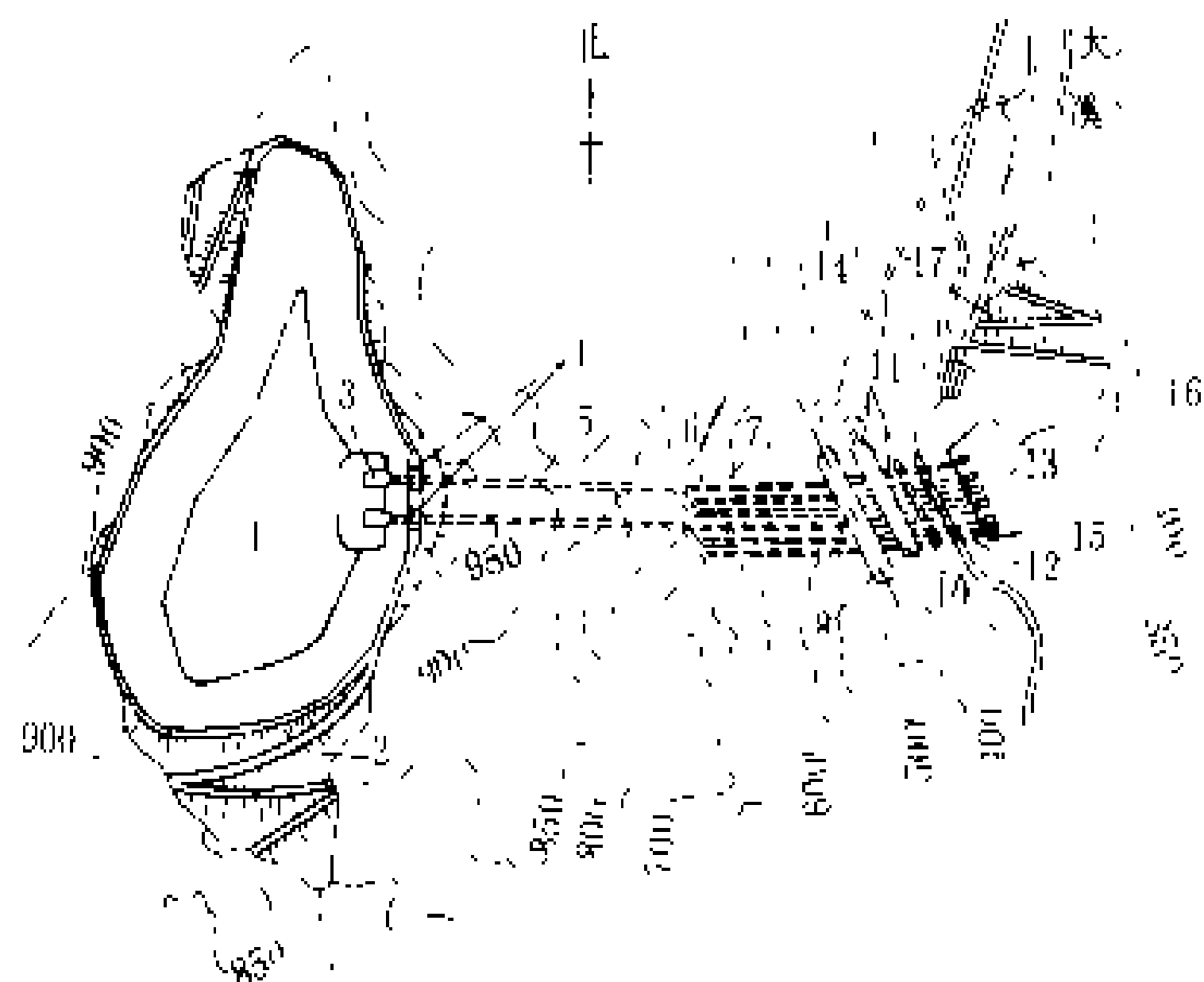
天荒坪抽水蓄能电站 (Tianhuangping Pumped Storage Power Station)

位于浙江省安吉县,距上海、南京、杭州分别为175,180,57 km。装机发电容量1800 MW,抽水容量1920 MW。年发电量31.6亿 kW·h,年抽水所用电量42.86亿 kW·h。以500 kV输电线路2回接入华东电力系统,供调峰、填谷和事故备用之需。可以承担系统负荷中3720 MW的峰谷差。可提供系统600 MW旋转备用容量,并有调相功能。使电力系统每年可节煤13~40万 t。

上水库和下水库 下水库建于太湖水系西苕溪的支流大溪上,上水库建于大溪的支沟源洼地上,见图。上下水库水平距离1 km,库底天然高差590 m,输水道长度与平均发电水头之比约为2.5。

下水库坝址集水面积25.5 km²,多年平均年径流量2450万 m³,枯水年也能保证抽水蓄能电站用水。设

计最高蓄水位 344.5 m, 相应库容 877 万 m^3 ; 最低蓄水位 295 m, 死库容 72 万 m^3 。按百年一遇洪水 536 m^3/s 设计; 千年一遇洪水 859 m^3/s 校核, 相应库水位 344.5 m。坝为混凝土面板堆石坝, 最大坝高 96 m, 坝顶长 230 m, 坝顶高程 351.2 m。左岸设开敞式无闸侧堰溢洪道, 堰长 60 m, 堰顶高程 344.5 m。右岸有由施工导流隧洞改建的供水及放空水库的隧洞, 最大放水流量 19.64 m^3/s 。下水库上游库尾设有拦沙坝, 高 21 m, 顶长 57 m, 其河床段 31 m 为溢流坝。



天荒坪抽水蓄能电站平面布置图

1—上水库; 2—上水库主坝; 3—上水库进(出)水口; 4—闸门井; 5—高压引水隧洞; 6—岔管; 7—压力钢管; 8—主厂房; 9—母线廊道; 10—主变压器洞; 11—尾水闸门廊道; 12—尾水隧洞; 13—下水库进(出)水口; 14—进厂交通洞; 15—下水库; 16—下水库坝; 17—溢洪道

上水库集水面积很小, 径流、洪水均可忽略。设计最高蓄水位 905.2 m, 总库容 885 万 m^3 ; 设计最低蓄水位 863 m, 死库容 50 万 m^3 。水库由主坝和 4 座副坝围筑而成。主副坝均为沥青混凝土面板土石坝。主坝最大坝高 72 m, 坝顶长 503 m。副坝最大坝高 9.3~34 m, 4 座副坝总长 822.3 m。水库库岸及库底均用沥青混凝土防渗。

引水系统 包括上下水库的进(出)水口、压力隧洞、岔洞和尾水洞。压力隧洞内径 7 m, 共 2 条。自上水库的进(出)水口起, 分为上水平段、斜井段(倾角 60°)和下水平段 3 部分。下水平段后, 每洞分为 3 条岔洞, 内径 3.2 m, 与机组相连。尾水洞直径 4.4 m, 单机单洞, 共 6 条。

地下厂房 主要洞室有主副厂房洞、主变压器洞、母线洞、尾水闸门洞和交通洞等。主副厂房洞长 198 m, 宽 21 m, 高 46 m。主变压器洞长 164.5 m, 宽 17 m, 高约 21 m, 与厂房洞平行, 净距 32 m, 与厂房洞有 6 条母线洞和 1 条主变压器运输洞相连。

主厂房内装有 6 台立轴单转轮单级混流可逆式水

泵水轮机和配套的发电电动机, 转速 500 r/min。水轮机工况, 最大水头 607.5 m, 最小水头 512 m, 额定水头 526 m, 出力 306 MW, 吸出高度 -70 m。水泵工况, 最大扬程 614 m, 最小扬程 523.5 m, 水泵输入功率 313 MW。起动方式以变频装置为主, 以背靠背同步起动方式为备用。发电电动机额定电压 18 kV, 发电额定容量 335 MV·A, 电动机容量 320 MW。主变压器为三相双绕组变压器。500 kV 高压配电装置为气体绝缘金属封闭电器。

工程施工 设计总工程量: 土石方明挖 564 万 m^3 , 石方洞挖 62 万 m^3 , 土石方填筑 516 万 m^3 , 混凝土浇筑 22 万 m^3 , 沥青混凝土 5.32 万 m^3 , 金属结构安装 1.7 万 t。下水库施工采用右岸隧洞导流全年断流的导流方式。

设计和建设单位 华东勘测设计院设计, 业主单位为华东电业管理局。

(董育坚)

lianran guliiao

天然骨料 (natural aggregate) 采集大自然产生的砂砾石, 经筛洗分级后制成的混凝土骨料。天然细骨料主要是河砂和风化砂。天然粗骨料是河流和山沟里冲积的卵石和砾石。

水电站工程常采用天然骨料, 一般能够就地取材。天然骨料颗粒较圆、表面光滑、比表面积小, 所以拌制的混凝土和易性好, 水泥用量和用水量较低, 最适用于大体积的水工混凝土。

天然骨料料源要经过调查、勘探、试验。在选择料场时, 首先要确定料场中骨料的质量和数量能否满足工程要求, 然后对各料场骨料质量的优劣、开采条件、占地面积、获得率、交通运输及加工费用等进行技术经济综合比较后选定。有的料场由于天然级配与设计使用级配相差太大, 为获得某级控制粒径的料, 而要大量增加开采量和弃料量。这样很不经济, 因此采用部分人工骨料, 调节天然级配与设计级配的差额。

在天然骨料中火山岩类骨料有时含有碱活性成分, 会与水泥中的氧化硅起化学反应, 而导致混凝土膨胀出现裂缝。使用前必须进行专门试验鉴定并采取掺用粉煤灰等火山灰质材料予以抑制。

(章景安)

tianran jianzhu cailiao kancha

天然建筑材料勘察 (natural construction material investigation) 调查建造水电站工程所需的天然建筑材料的地质勘察工作。它是水电工程地质勘察的一个组成部分, 常用的天然建筑材料有砂

砾石、块石、土及水泥掺合料等。砂砾石是水工混凝土的主要材料和土石坝的坝壳料及反滤料。土料用于堆筑土坝和作为防渗料。块石用于堆石坝坝体、护坡、浆砌石料或轧制人工骨料。天然建筑材料勘察的主要任务是调查与选择各种建筑材料的产地，阐明可采料的储量、质量及开采条件，为确定坝址和坝型提供依据。

勘察要求 建筑材料勘察一般分普查、初查和详查三个阶段，需要时还可进行复查或补充详查工作。普查勘察是在工程规划选点阶段对规划的河段或流域进行地质普查，辅以少量的物探及坑槽探，结合规划梯级布置选择料场和估算储量（编制 1：100000～1：50000 的产地分布图及草测 1：10000～1：5000 剖面图）。初查勘察是在可行性研究阶段进行大、中比例尺地质测绘，了解料场地质及水文地质条件，按规程要求布置勘探网点，查明料层分布及取样试验（编制 1：50000～1：25000 产地分布图、1：10000～1：2000 产地综合平面图及 1：5000～1：2000 剖面图）。初查储量要求不少于设计需要量的 3 倍，储量误差不超过 40%。详查勘察是在初步设计阶段进行大比例尺地质测绘，加密原有勘探网点，进行勘探、取样及试验（编制 1：50000～1：10000 产地分布图、1：5000～1：1000 产地综合平面图及 1：2000～1：500 剖面图）。详查储量不少于设计需要量的 2 倍，储量误差不超过 15%。复核或补充详查勘察，多是为核实已有资料的准确性或施工方案及料场的改变、设计和施工采用新的工艺等原因，需要另辟料源而进行的，其工作量视具体情况而定。

勘探和取样试验 建筑材料产地勘探点密度及取样数量，是根据勘察级别、地形及地质等因素确定的。总的原则是随勘察级别的提高，勘探网点逐渐加密。如砂砾石料勘探一般是先用物探了解料场有效层的分布及地下水埋深，而后有针对性地进行坑槽或钻探控制。水上部分宜用坑槽，既便于观察料层，又可满足取样的要求。水下部分多用较大口径的管钻，孔深至最大开采层以下 1 m 为宜。试验样品选取，既考虑层数，又须注意层厚，样品组数通常按产地的储量大小确定。样品的试验项目，各种材料是不同的，虽是同一种材料，也要以它在工程上的具体用途而定。

储量计算 计算储量时，首先在料场平面图上，根据勘探界限圈定范围，然后再按地形、料层结构及勘探点的布置选择计算方法。常用的方法有平均厚度法、平行断面法及三角形法。计算时扣除开采料层上部及内部的无效层；水上、水下的储量分列；计算深度至勘探实际控制的深度。

勘察成果 天然建筑材料勘察报告的内容一般为：①概述产地位置与建筑工地的距离，料场地貌、水

文地质条件，料层的埋藏及开采条件。②勘探工作的布置、取样方法及试验的数量。③各种材料的试验成果和质量。④储量计算方法和总的储量。⑤根据任务要求评价各产地的储量及质量。⑥提出料场选择意见及进一步工作的建议。报告的附图主要有产地分布图、料场综合平面图、料场剖面图、试验成果汇总表及储量计算表等。

（崔诗礼）

Tianshengqiao Erji Shuidianzhan

天生桥二级水电站 (Tianshengqiao 2 Hydropower Station)

红水河梯级水电站中的第二级，位于红水河支流南盘江下游河段上，地跨贵州省安龙县和广西壮族自治区隆林县，距贵阳市 385 km，有公路相通。电站为引水式，初期装机容量 880 MW，保证出力 199 MW，多年平均年发电量 49.2 亿 kW·h；最终装机容量 1320 MW，保证出力 730 MW，多年平均年发电量 82 亿 kW·h。混凝土重力坝最大坝高 58.7 m。电站以 5 回（其中 1 回备用）500 kV 输电线路向广东、广西和贵州送电，以 2 回 220 kV 输电线路连天生桥一级水电站的换流站的交流母线与天生桥一级联络，以 4 回 220 kV 输电线路向广西、贵州送电。工程于 1982 年开工，1992 年 12 月第一台机组发电，1993 年 9 月第二台机组发电。

水文及水库特性 坝址以上流域面积 50194 km²，占南盘江流域面积的 89.3%。多年平均流量 615 m³/s，多年平均年径流量 194 亿 m³。百年一遇设计洪水流量 13500 m³/s，千年一遇校核洪水流量 19400 m³/s。多年平均年输沙量 1490 万 t。总库容 0.88 亿 m³，调节库容 0.184 亿 m³，属日调节水库。电站设计水头 176 m，最大水头 204 m，最小水头 174 m。

枢纽布置 坝址区地层为薄层灰岩夹页岩，引水隧洞洞线通过的主要地层为灰岩和砂页岩，厂区主要地层为砂页岩。枢纽建筑物由首部枢纽、引水系统和电站厂房等组成，见图。

首部枢纽工程见图 (c)，有河床溢流坝段，左、右岸非溢流坝，右岸进水坝段和冲沙闸等，坝顶全长 463 m。河床溢流坝为碾压混凝土重力坝，长 138.1 m，设有 9 个溢流表孔，孔口尺寸为 12 m×13.7 m，由平板钢闸门控制，采用面流消能，护坦长 30 m。右岸引水系统由进水口、引水隧洞、调压井和压力管道等组成。引水隧洞共 3 条，洞线近于平行，平均洞长 9.55 km。根据不同的开挖方法和衬护型式，隧洞各段内径不等，为 8.7～10.4 m。3 座调压井均采用带上室的差动式，圆井内径 21 m，高 88 m。调压井后分为 6 条压力管道，见图 (b)。压力管道内径 5.7 m。

电站厂房为岸边式厂房,厂内安装6台混流式水轮发电机组,单机容量220 MW。水轮机转轮直径4.5 m,转速200 r/min,吸出高度-5.5 m。发电机为空冷半伞式,额定容量220 MW,额定功率因数0.9,额定电压18 kV。3台单台容量为500 MV·A的500 kV三相双绕组强油风冷组合式变压器及高压配电装置设在厂房后侧。500 kV和220 kV电压间设有750 MV·A自耦联络变压器一组。

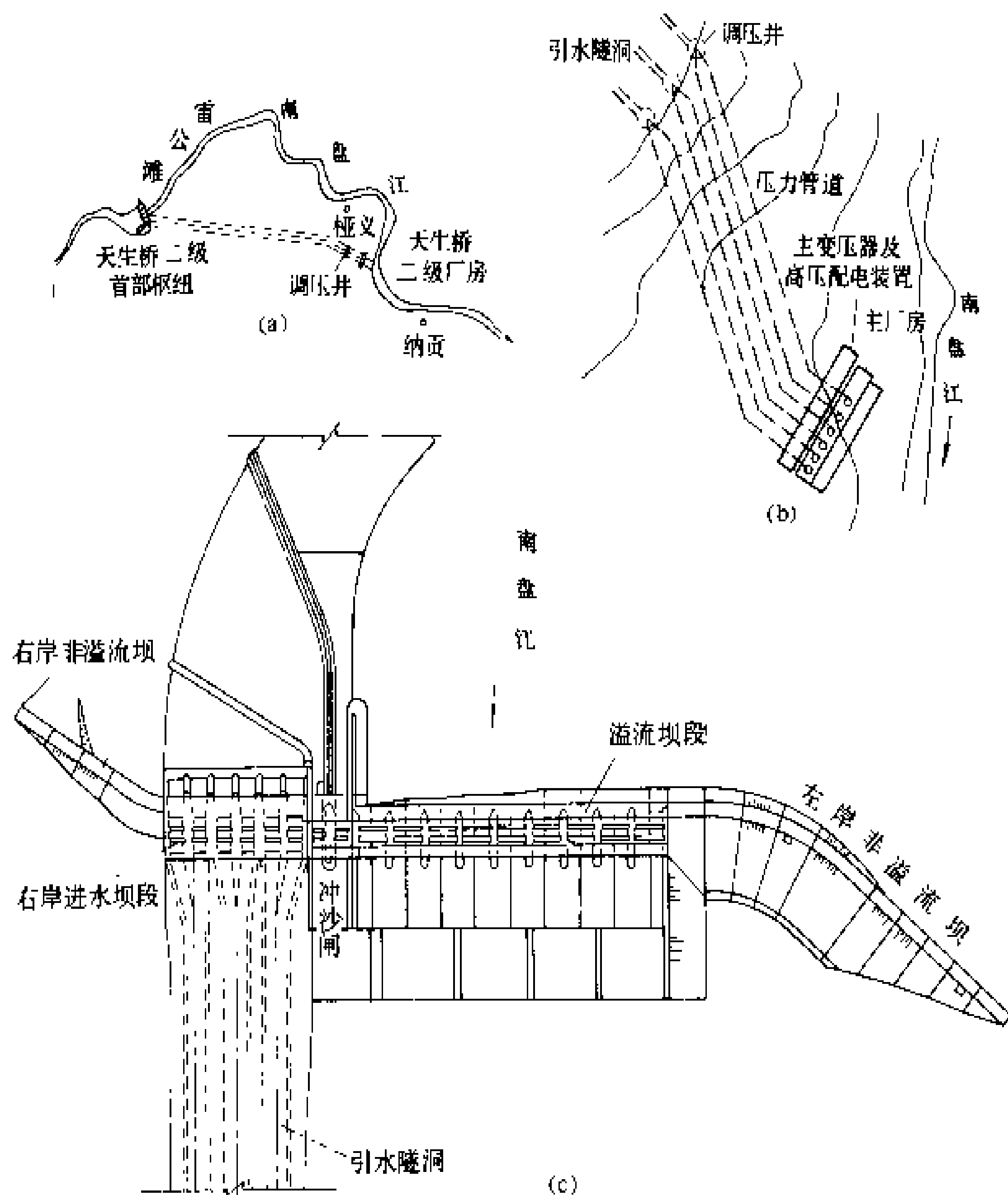
power Station) 红水河梯级水电站的最上一级,位于红水河上游南盘江干流上,地跨贵州安龙县和广西隆林县。下游7 km是天生桥二级水电站首部枢纽,上游约62 km是南盘江支流黄泥河上的鲁布革水电站厂房。电站以发电为主,并可提高下游已建的天生桥二级、大化和岩滩3个水电站的保证出力共计839 MW和年发电量共计40.77亿kW·h,同时对下游梯级水电站及河道防洪均有作用。电站装机容量1200

MW,保证出力405.2 MW,年发电量56.26亿kW·h,用220 kV电压输电线路4回接下游右岸距水电站4 km处的马窝换流站,用直流±500 kV电压向广东送电。混凝土面板堆石坝最大坝高178 m。工程于1991年开工,设计总工期9年,计划第7年第1台机组发电。

水文和水库特性 坝址以上流域面积50139 km²,占南盘江全流域的89.4%。多年平均流量612 m³/s,多年平均年径流量193亿m³。主体工程按千年一遇洪水设计,洪峰流量20900 m³/s,相应库水位782.87 m,相应泄流量15282 m³/s。按可能最大洪水校核,洪峰流量28500 m³/s,相应库水位789.86 m,相应下泄流量21750 m³/s,总库容102.57亿m³。正常蓄水位780 m,相应库容83.95亿m³。死水位731 m,调节库容57.96亿m³。属不完全多年调节水库。电站设计水头110.7 m,最大工作水头143 m,最小工作水头83 m。

枢纽布置 坝址河谷比较开阔,岩层由石灰岩、砂岩、泥岩及泥灰岩组成。坝址区地震基本裂度6度,设计烈度7度。枢纽工程包括拦河坝、右岸放空隧洞(压力洞段直径9.5 m,无压洞段8 m×12 m)及右岸开敞式溢洪道(弧形闸门5孔,13 m×20 m,陡槽底宽81~114.7 m,出口挑流消能)、左岸引水系统和厂房等建筑物,见图1。

主坝断面见图2。坝顶高程791 m,防浪墙顶高程792 m(墙高4.7 m,露出坝顶1 m),最大坝高178 m,坝顶长1137 m,坝顶宽14 m,最大坝底宽505.82 m,上游坝坡及下游平均坝坡为1:1.4。混凝土面板厚度从坝顶部的0.3 m渐变为坝底部的0.9 m,双向配筋,



天生桥二级水电站枢纽布置图

(a) 天生桥二级水电站平面位置示意图; (b) 厂房枢纽; (c) 首部枢纽

工程施工 首部枢纽采用明渠导流、过水土石围堰枯水期挡水施工方式。引水隧洞根据不同地层情况分别采用钻爆法和全断面掘进机(直径10.8 m)开挖方式。总工程量为:土石方明挖603万m³,石方洞挖351万m³,混凝土浇筑150万m³,喷混凝土18.5万m³,金属结构安装1.63万t。

设计和施工单位 贵阳勘测设计院设计,武警水电第一总队和水利电力部第九工程局施工。

(朱经祥)

Tianshengqiao Yiji Shuidianzhan

天生桥一级水电站 (Tianshengqiao 1 Hydro-

含筋率 0.4%。面板竖向缝间距为 16 m。混凝土趾板厚 0.6~1.0 m，宽 6~10 m，用锚筋与基岩连接，并

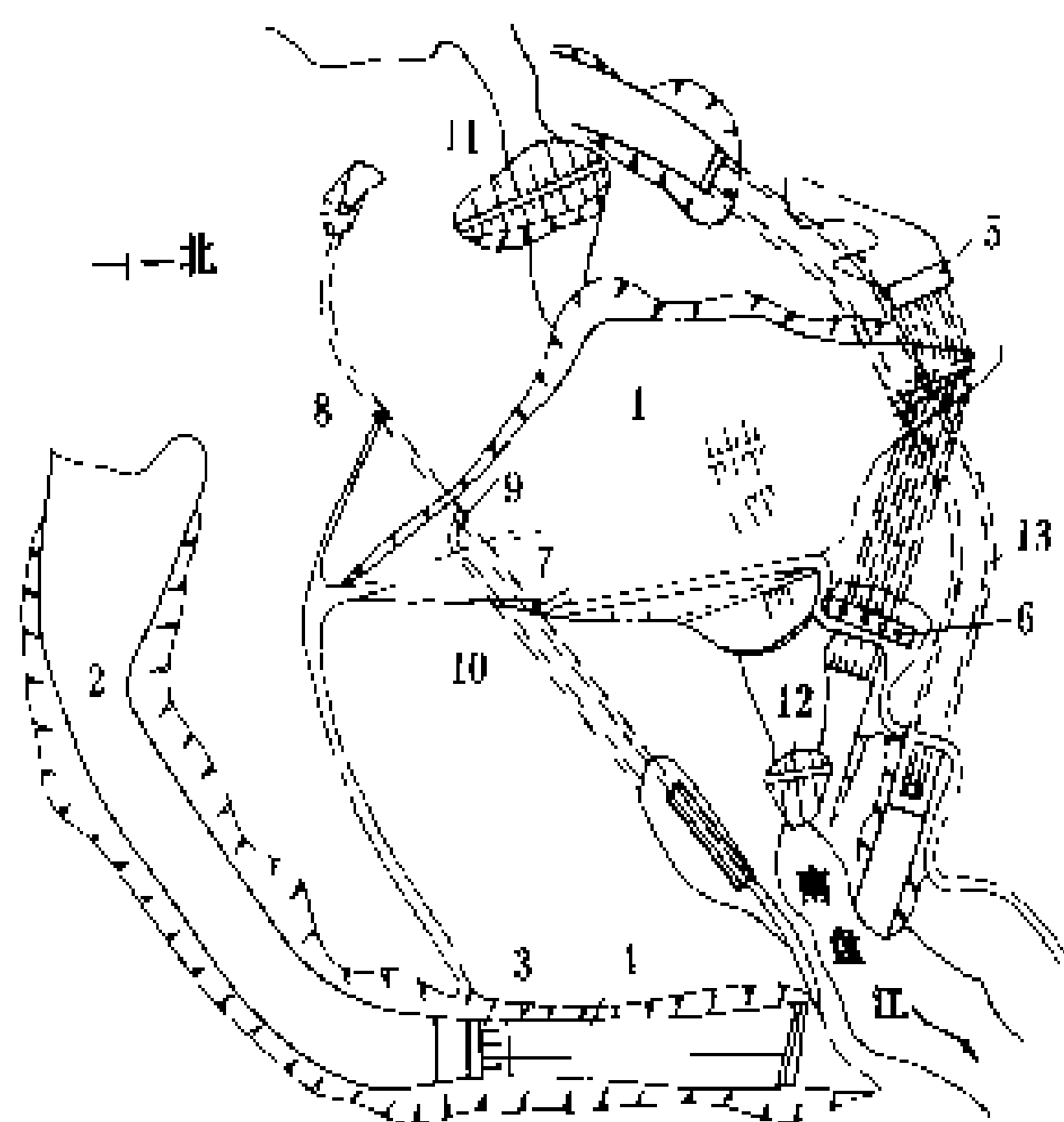


图 1 天生桥一级水电站枢纽平面布置图

- 1—混凝土面板堆石坝；2—溢洪道引渠；3—溢流堰；4—泄槽；5—电站进水口；6 主厂房；7 放空隧洞；8 事故闸门井；9 工作闸门室；10—交通、通风洞；11—上游围堰；12—下游围堰；13—导流隧洞

进行固结灌浆及帷幕灌浆。面板与趾板连接处的周边缝设有 3 道止水：缝底部为止水铜片；中部为塑胶止水带；顶部为塑胶混合填缝料。靠近岸边的面板张性竖向缝，缝底设止水铜片，缝面涂沥青乳剂，缝顶覆盖塑胶混合料。靠河的压性竖向缝，只在底部设 1 道止水铜片，缝面涂沥青乳剂。另在坝上游坡面下部铺盖土料，起辅助防渗作用。坝的堆石体主要采用溢洪道区开挖的石灰岩，部分利用工程开挖的砂岩泥岩混合料。趾板建基面为弱风化岩层，整个坝的堆石体坐落在清除覆盖层后的岩基面上。

溢洪道布置在右岸垭口处。引水渠长约 1215 m，底宽 110 m。溢流堰顶高程 760 m，溢流前沿总宽 81 m，设溢流孔 5 孔，用 13 m×20 m 的弧形闸门控制。泄槽长 530 m，底宽 81~114.7m，出口为挑流消能。

放空隧洞进口底坎高程 660 m，全长 1033.9 m，压力洞段圆形断面直径为 9.6 m，无压洞段断面为 8 m×12 m，出口为挑流消能。

引水道由 4 条内径 9.6 m，长 288.84~290.02 m 的低压隧洞及其后的 4 条内径 9.0~7.8 m，长 191.11 m 的高压钢管组成。主厂房为地面岸边式，长 145 m，宽 26 m，高 61.5 m，安装 4 台容量为 300 MW 的混流式水轮发电机组。120 MV·A 单相主变压器 13 台（含备用相 1 台）布置在尾水平台上。

工程施工 设计主要工程量为：土石方明挖 2298.59 万 m³，石方洞挖 83.16 万 m³，土石方填筑 1898.34 万 m³（其中坝体 1770.9 万 m³），混凝土和喷混凝土 120.03 万 m³（其中坝体 11.83 万 m³），帷幕灌浆 5.4 万 m，固结灌浆 2.32 万 m，金属结构安装 18300 t。枢纽施工采用左岸 2 条 13.5 m×13.5 m 导流隧洞导流、截流后第一个汛期坝面过水的导流方式，以后各年则利用坝体挡水渡汛。场内外交通均采用公路运输。

设计和建设单位 昆明勘测设计院设计，南方电力联营公司筹建。

（赵增凯）

tiandiao biao zheng

调节保证（guaranty of regulation） 保证水轮发电机组的转速上升率和引水系统的压力上升率不超过允许值的技术措施。水电站引水管中由于水流

速度迅速改变而产生的压力骤升骤降的现象称为水锤（见水击）。机组甩负荷瞬间，水轮机导水叶紧急关闭截断水流，引水管中流动着的水体在惯性作用下在管中造成水压升高，在尾水管首部造成负压甚至真空，升压和负压值随导水叶关闭时间的缩小而增大，危及引水系统的安全；同时，由于负荷瞬间甩去，压力水流逐渐减小，使得运行中的机组出现转速上升，其值随导水叶关闭时间 t_s 的增长而增大，危及机组安全。在水电站设计中要进行调节保证计算，包括压力上

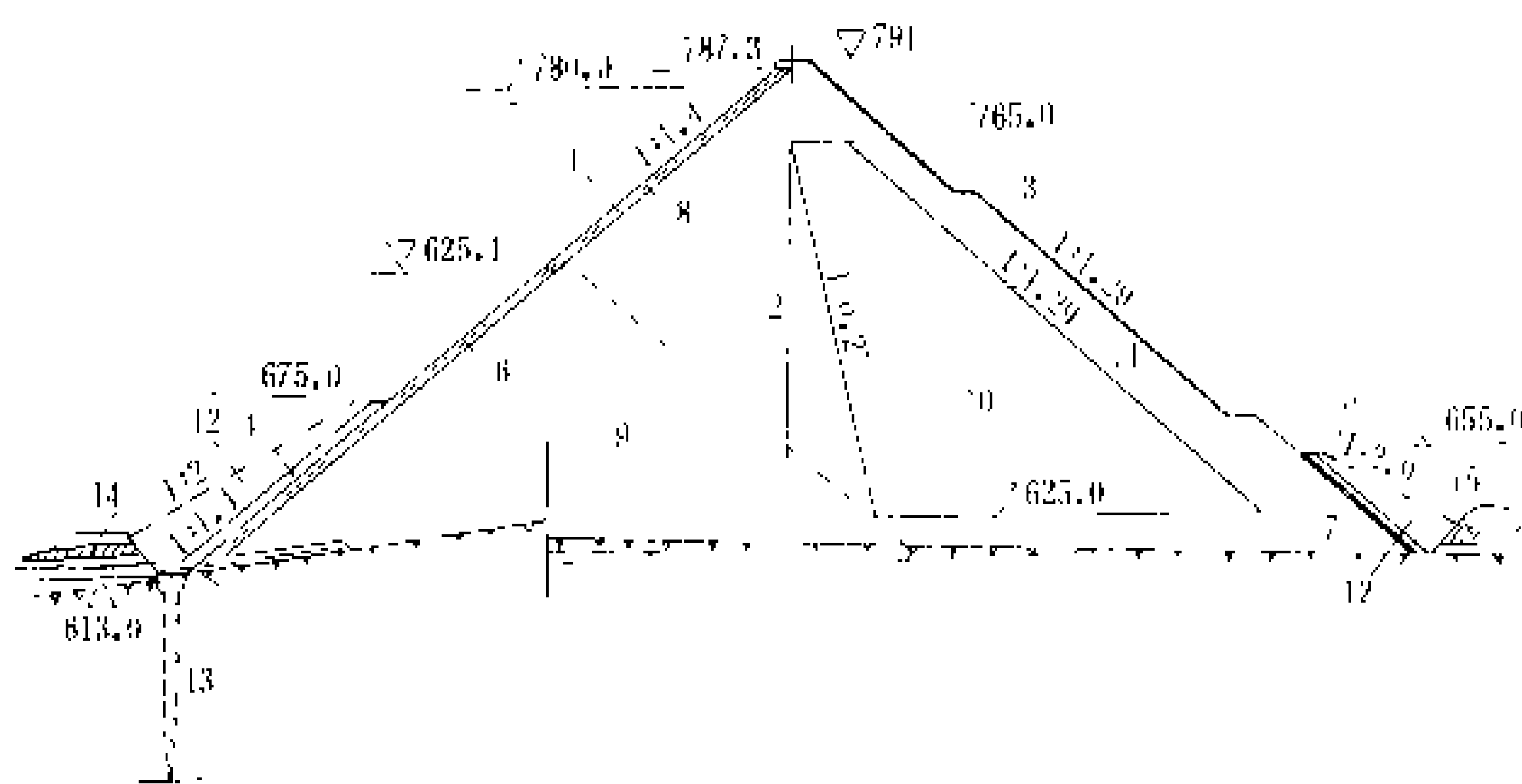


图 2 天生桥一级水电站混凝土面板堆石坝标准断面图

- 1 混凝土面板；2 坝轴线；3 下游大块石护坡；4 粉质土铺盖；5—土料；6—人工灰岩料垫层；7 砂砾料；8 人工灰岩料过渡层；9—灰岩主堆石；10—开挖利用的砂、泥岩及灰、泥岩料堆石；11—溢洪道开挖的灰岩大块石料；12—土石混合料；13—帷幕灌浆；14 冲积层；15 淤泥层



升率和转速上升率计算,选用合适的引水管特性系数、机组的转动惯量和导水叶关闭时间以满足调节要求。

引水管特性系数 σ 它是决定压力上升率的重要因素, σ 增加压力上升值也增大, σ 的表达式为

$$\sigma = \frac{\Sigma Lv}{gHt_s} \quad (1)$$

式中 ΣLv 为引水管、蜗壳和尾水管长度和流速乘积的总和, m^2/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; H 为最大静水头, m ; t_s 为导水叶关闭时间, s 。

机组飞轮力矩 它是决定转速上升率的重要因素,飞轮力矩 GD^2 增大转速上升率下降, GD^2 的计算式为

$$GD^2 = \frac{182Pt_s f}{n_0^2 \beta} \quad (2)$$

式中 P 为甩负荷前水轮机的轴功率, kW ; t_s 为导水叶关闭时间, s ; f 为水锤修正系数, $f=1+\sigma$; n_0 为甩负荷时水轮机的初始转速, r/min ; β 为转速上升率, %。

改善调节保证计算的措施 所采取的措施包括设置调压井、装设调压阀、加大机组的飞轮力矩以及导水叶分段关闭等。

(1)设置调压井。当引水管 ΣLv 值过大,一般是 $\Sigma Lv/gH > 2.5 \sim 3$ 时,在引水管适当位置设调压井从而减小引水管长度。

(2)装设调压阀。在甩负荷关闭导水叶的同时开启装设在反击式水轮机蜗壳上的调压阀泄流,然后再缓慢关闭,使导水叶能快速关闭控制转速上升率和拉长水流截断时间,控制压力上升率。



导水叶分两段关闭示意图

a_0 导水叶开度; t_{s1} 直线关闭总时间; t_{s1}' 第一段关闭的有效时间; t_{s2} 两段关闭总时间

(3)加大机组的飞轮力矩 GD^2 ,适当增大发电机转子直径及重量,小型机组可以增装飞轮。

(4)采用导水叶分段关闭。当导水叶按通常直线规律关机不能满足调节保证要求时,可以采用如图示的分段关闭规律关机。实现分段关闭的途径有:①改变水轮机调速器主配压阀搭叠量;②在导水叶接力器筒身上设计加工分段供、排油孔;③在供、排油管路上装设利用导水叶开度信号进行控制的节流阀。

(青长庚)

tiaosuiqi tiaojie guilü

调速器调节规律 (regulation law of governor)

水轮机调速器输出信号与输入信号之间的函数关系。水轮机调速器的调节规律反应调速器的动态特性。常用的研究方法是经典控制理论。实际使用的调速器大多数具有比例-积分 (PI) 调节规律或比例-积分-微分 (PID) 调节规律。微机电气液压型调速器的出现,使得有可能在水轮机调节中应用现代控制理论,例如自适应 PID 调节规律、频率最佳控制规律、在线优化经济协联控制规律等。

PI 调节规律 调速器的输出信号与输入信号及其积分成正比。比例(P)作用有利于稳定,并容易做到线性化使伺服机构可能引起的非线性减小或消除。但比例调节作用与输入信号即被调量的偏差成比例,因而会使控制系统形成稳态偏差。积分(I)调节作用只有输入偏差为零时,积分环节的输出才趋于稳定,即被调量和给定量相等,系统才达到稳定状态,因而可以消除调节的稳态偏差,但会使稳定性降低,有时甚至会造成不稳定。PI 调节规律同时具有比例和积分作用,可达到既减小系统稳态偏差又不降低动态稳定性的效果。带有 PI 调节规律的调速器合理整定其调节参数可以满足引水道水流惯性时间常数 T_w 不是很大(一般情况下 $T_w \leq 2.5 s$) 的电站的水轮发电机组的调节要求。

PID 调节规律 调速器的输出信号与输入信号、输入信号的积分和微分成正比。常用比例、积分和微分三个环节的并联来实现 PID 调节规律,而将液压部分做成液压随动系统。比例环节的输出量每一瞬间都与输入量成正比。比例作用有利于稳定,并容易做到线性化,减小或消除伺服机构可能引起的非线性。积分环节的输出量与输入量的积分成正比,积分作用可以消除调节的稳态偏差。微分环节的输出量与输入量的变化率成正比。微分(D)调节是按被调量偏差的变化速度进行调节,能在偏差过大出现之前进行有效的校正,因此能够减小系统的最大偏差、增加系统的稳定性和减少调节时间。具有 PID 调节规律的调速器综合了比例、积分和微分三种调节作用。适当调整、设定各环节的参数就有可能使控制系统同时得到比较完善的动态和稳态性能。所以当单机容量占系统容量比例较大或承担调频任务的机组宜采用具有 PID 调节规律的调速器。具有 PID 调节规律的调速器还可适用于引水道水流惯性时间常数 T_w 较大(可达 $4 s$) 的电站的水轮发电机组的调节。

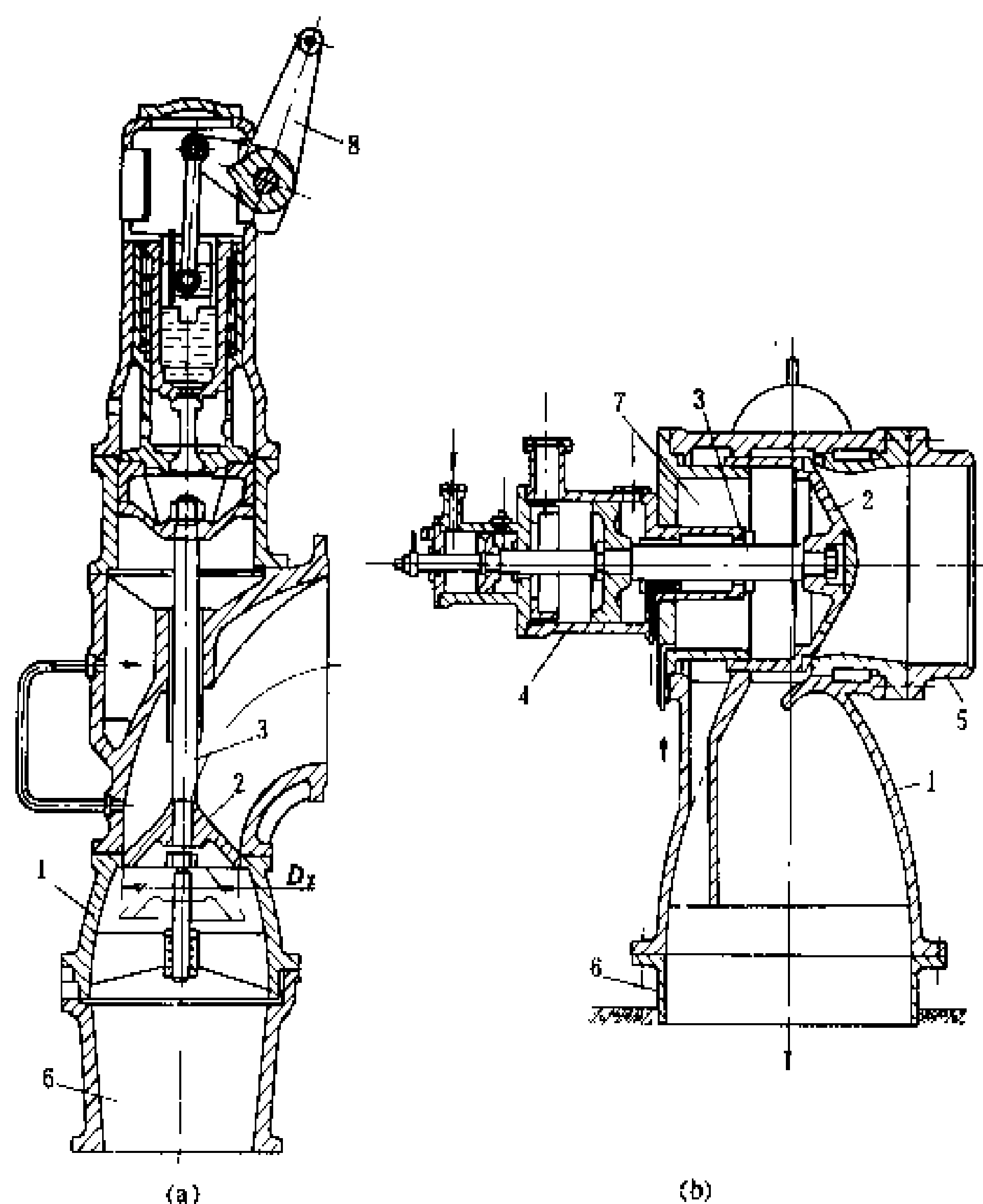
(张学中)

tiaoyafu

调压阀 (relief valve) 限制水电站引水系

统水击压力升高值的阀门。一般用于具有长引水系统无调压井的中高水头水电站的反击式水轮机上。在机组甩负荷导水叶快速关闭的同时,调压阀开启泄流,它开启过程流量增加的规律应和导水叶关闭过程流量减少的规律相匹配,待导水叶全关后,再缓慢关闭调压阀,这样,尽管通过水轮机的流量迅速减少,而引水钢管内的流量变化却大大减缓,从而使水击压力不超过给定值,由于导水叶是快速关闭,机组转速上升值可限制在允许范围内。调压阀是长引水系统水电站的重要安全设备,万一调压阀拒动,必须延长导水叶关闭时间,以保证水压不超过允许值。调压阀一般由阀壳、阀盘、阀杆、接力器、进口接管、排水管、平衡腔等组成。

调压阀分类 按调压阀的布置分,有立式和卧式两种,见图。按调压阀和导水叶间的联动方式分,有机械联动和液压联动两种,机械联动的横杆多,关节多,惯性大,累计的间隙和变形也大,使调压阀开启滞后于导水叶开始关闭的时间长,布置也不方便,近年来多采用液压联动。



调压阀

(a) 立式调压阀; (b) 卧式调压阀

1 阀壳; 2 阀盘; 3—阀杆; 4—接力器; 5—进口接管; 6 排水管;
7 平衡腔; 8—联动横杆

运行方式 调压阀有节水和耗水两种运行方式,前者在正常运行时调压阀是关闭的,只在甩负荷或紧

急停机时动作;后者在正常运行时调压阀开启泄水并与导水叶协联动作,不仅在甩负荷和紧急停机时动作限制水击压力,而且能在正常运行时加快增减负荷的速率,提高调节系统的稳定性,但耗水量大,仅适用于下游经常需要放水的情况。

结构 调压阀的流道应具有大的过流量和较小的汽蚀、振动,并应通过模型试验确定。阀盘有锥形和圆形两种,用铸钢制造,表面镀铬防锈,其上设有均压孔以减小操作力,它和阀座的密封圈采用不锈钢经研磨密合,并应有足够止水压力,保证封水严密,以免间隙汽蚀。阀杆用锻钢,阀壳、接力器等用铸钢制造,进口接管和排水管用钢板焊接,排水侧应采取消能及补气措施。

(吴次光)

tiayoshi

调压室 (surge chamber) 减少压力管道和有压尾水道水击作用的建筑物。调压室多利用水体调压。位于地面以上的称调压塔,位于地面以下的称调压井。近年来出现的气垫式调压室,在封闭的洞室中贮存压缩空气,利用水、气体调压。位于机组上游侧的称上游调压室,位于机组下游侧者称尾水调压室(图1)。

当水电站的负荷变化,导水叶开度改变产生水击时,调压室既可防止水击压力传播到压力引水道或尾水隧洞中,又可减小高压管道、蜗壳及尾水管中的水击压力。并可减少机组转速变化率,改善运行条件。调压室的体积大,施工难,造价高,是否应当设置调压室,应由调节保证计算和技术经济比较来决定。

利用调压室的容积容纳或补充由于负荷变化所减少或增加的进入水轮机的水体,从而减小水击作用,并截断或减小水击波继续向前传播。这时调压室内的水面产生波动。为了保证调压室水面波动逐渐衰减,调压室断面应大于稳定断面。D. 托马(D. Thoma)于1910年提出了著名的托马公式,至今仍为确定调压室稳定断面的准则。

托马稳定断面(F_{th})的计算公式如下

$$F_{th} = \frac{Lf}{2gaH_1}$$

式中 L 为引水道长度, m; f 为引水道断面面积, m^2 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; a 为引水道的水头损失系数; $H_1 = H_0 - h_{w0} - 3h_{w0}$, m; H_0 为静水头,



$m; h_{w0}$ 为引水道的水头损失, $m; h_{w0}$ 为压力管道的水头损失, m 。

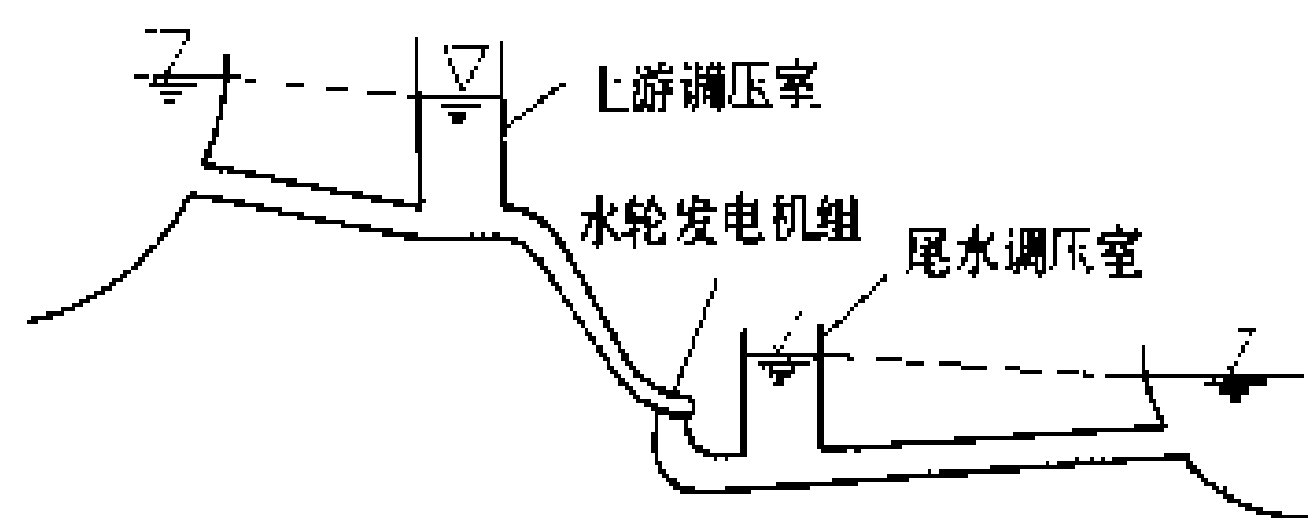


图1 调压室位置示意图

基本类型 有简单式、阻抗式、双室式、溢流式、差动式、气垫式 6 种。调压室基本类型见图 2。

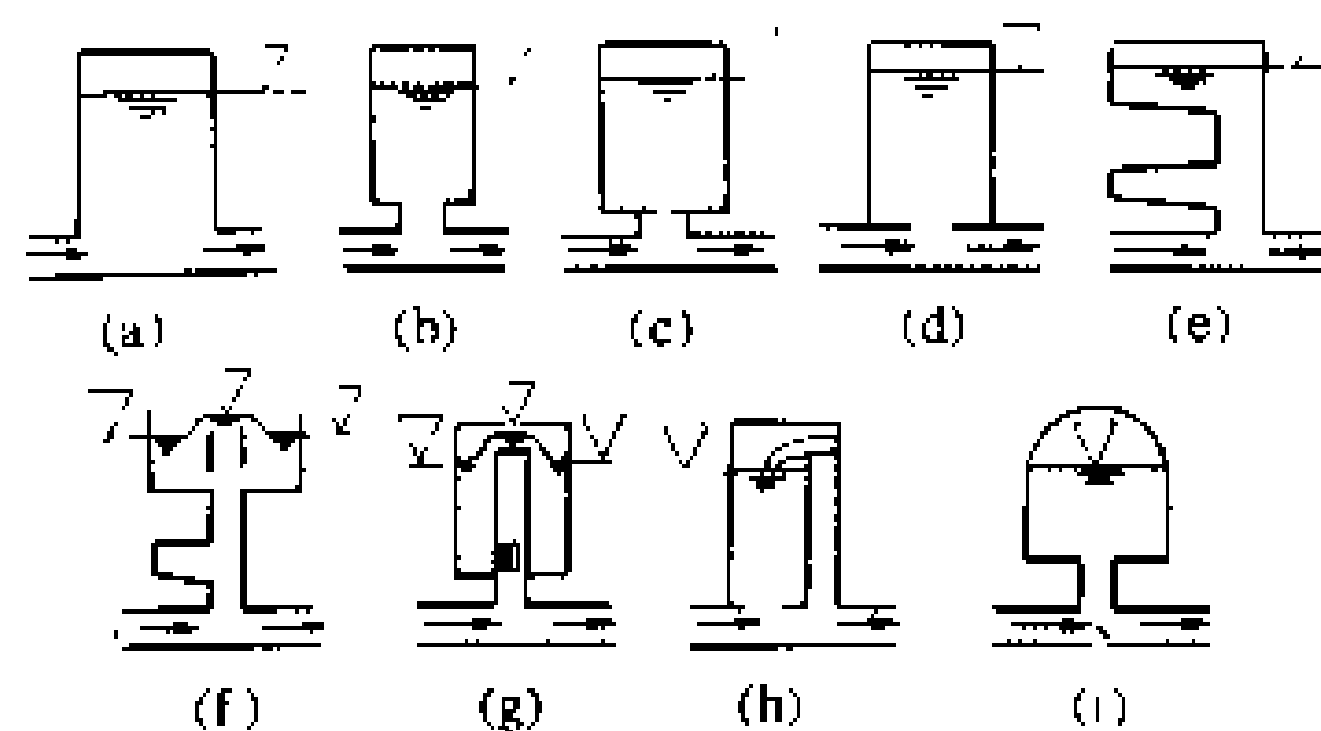


图2 调压室基本类型示意图

(a)、(b) 圆筒式；(c)、(d) 阻抗式；(e) 双室式；
(f) 溢流式；(g)、(h) 差动式；(i) 气垫式

(1) 简单式调压室, 如图 2 (a) 所示。其特点是断面不变, 室身多为一圆筒, 引水道(尾水道)与调压室直接连接。结构简单; 水击反射条件好; 室内水位变化缓慢均匀, 对水轮机影响较小。但工程量较大、造价不够经济; 调压室中水位波动衰减得慢, 对水轮机工作影响的时间长; 在正常运转时, 引水系统与调压室连接处水力损失大, 为避免此缺点, 把引水道与调压室分开, 用连接管连接, 如图 2 (b) 所示。为了避免水击波进入引水道过大, 连接管的直径不宜取得太小。

(2) 阻抗式调压室, 如图 2 (c)、(d) 所示。这种调压室将圆筒形的室身用较小断面的孔口, 或较小孔口尺寸的隔板与引水道连接起来。这种孔口或隔板对水流产生局部阻力, 故取名为阻抗式。当丢弃负荷时, 水由引水道经阻抗孔进入调压室, 阻抗使水头损失增加, 减小了引水道首尾两端的水位差, 因而减小了调压室中水位波动的振幅。由于存在孔口阻力, 在引水道与调压室之间产生压力差, 这样就使引水隧洞末端的初始压力增高值较简单式调压室为大。当增加负荷时, 水由调压室经过阻抗孔进入压力管道, 为了克服这种阻力, 调压室中水位降低值也要小一些。

(3) 双室式调压室, 如图 2 (e) 所示。这种调压室由断面较大的上室及下室和连接上、下室断面较小的竖井组成。上室供丢弃负荷时储水用, 一般应在最高静水位之上。在恒定流时, 下室经常充满着水、供增加

负荷时补给水量用, 因而下室的顶板应在死水位之下。在恒定流时, 调压室中的自由水面位于竖井中, 当丢弃负荷时, 由于竖井的断面较小, 井中水位上升很快, 但进入上室后立刻缓慢下来, 也就减小了水位波动振幅。增加负荷时, 水位下降到下室中, 在引水道开始供给水轮机所需流量之前, 下室应有足够的水量。这种调压室上室的容积是比较小的, 因为当丢弃负荷时, 引水道中水的动能转化成上室中水的位能, 因其重心比圆筒式调压室高, 故同样的能量可得到较小的上室容积。这种调压室适用于电站水头较大, 要求的稳定断面较小, 而水库水位变化比较大的水电站中。

(4) 溢流式调压室, 如图 2 (f) 所示。溢流式调压室顶部有溢流堰。当丢弃负荷时, 调压室的水位迅速上升, 溢出的水量可以排至下游, 也可以储存于上室, 待竖井水位下降时, 上室的水量经溢流堰底部的回流孔道流回竖井。

(5) 差动式调压室, 如图 2 (g) 所示。这种调压室由升管和外室两部分组成: 升管设于调压室中直径较小, 其上端为开口, 下部沿升管圆周设有阻力孔口, 调压室外室的水经阻力孔口与升管相通, 升管底部以连接管与引水管道相衔接。外室直径较大, 起盛水及保证水位波动稳定的作用。当丢弃负荷时, 因升管的直径较小, 升管水位很快就升至顶部开始溢流。在水位升高的过程中, 引水道首尾两端水位差减小得很快, 升管溢流后, 引水道尾端水位高于库水位, 得以较快地减少引水道流来的水量; 同时升管中的水位高于外室水位, 所以一部分水量通过阻力孔口流入外室, 因而需要外室的容积较小, 当增加负荷时, 升管中的水位很快地降低, 引水道首尾两端水位差增加得较快, 引水道中流来的水量增加得也较快, 同时水流由外室通过阻力孔口流入高压管道, 以供给水轮机所需要的流量。差动式调压室也有把阻力孔口设在底板上的, 而把阻力孔口与升管分开, 如图 2 (h) 所示。这种结构施工较方便, 水击反射条件较好。差动式调压室所需要的容积较小, 水位波动衰减较快, 但是由于多了一个升管, 使调压室的结构变得较为复杂。

(6) 气垫式调压室, 如图 2 (i) 所示。调压室顶部完全封闭, 内部充以压缩空气。这种调压室不受地形条件限制, 可以尽量靠近厂房以减小水击压力; 由于所充的是压缩空气, 避免了调压室内水位波动; 与圆筒式调压室比较, 可较大地减小调压室高度, 在地下电站中还可省去较长的通气竖井或隧洞; 与阻抗式调压室比较, 其水击反射条件较好, 压力变化也较缓慢, 使水轮机调节比较容易。这种调压室水位波动稳定条件较差, 需要较大的调压室断面, 需配置压缩空气机。这种新型调压室首创于挪威, 运行经验尚少。

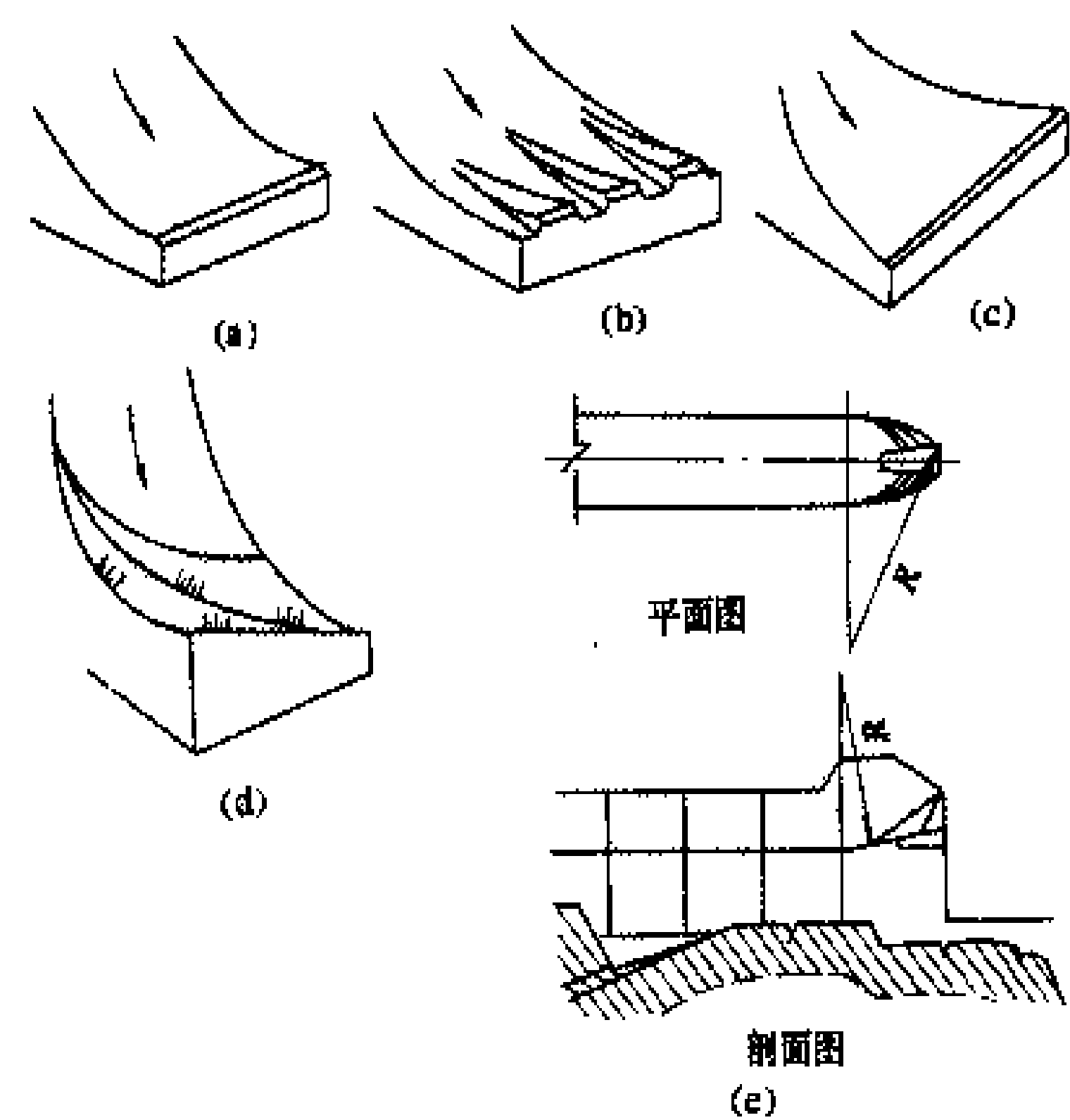


当厂房下游有较长的有压隧洞，丢弃负荷导水叶迅速关闭产生负水击低于大气压力 8 m 水柱时，需设置尾水调压室以减小水击作用，尾水调压室应尽可能地靠近厂房。

(刘维德 王树人)

tioliu bikan

挑流鼻坎 (flip bucket) 设于泄水建筑物末端，对过坝急流导向挑射到下游河床水垫中消能的建筑物。挑流鼻坎有连续式、差动式、扩散式、扭曲式、窄缝式等五种型式，见图。



挑流鼻坎类型图

(a) 连续式；(b) 差动式；(c) 扩散式；(d) 扭曲式；
(e) 窄缝式

连续式挑流鼻坎体型尺寸简单、在工程中采用较多。差动式挑流鼻坎可使挑流水舌分散并在空中碰撞和掺气，消能效果较好，但需注意防止鼻坎空蚀。扩散式挑流鼻坎能使水舌在平面上充分扩散。窄缝式或扭曲式挑流鼻坎能适应窄峡谷地形，防止水舌冲刷岸坡，使挑流水舌顺河纵向扩散消能。

挑流鼻坎多用于高水头泄水建筑物，一般鼻坎布置在下游水位以上，以便水舌下面能补气，形成挑流水舌，同时也使鼻坎具有检查维修的条件。为了加强挑流碰撞消能，可利用不同高程或不同平面位置的水舌相互对冲的消能效果。

挑流鼻坎承受较大的动水压力，基础应放置在良好基岩上，并有一定埋深以防反向水流冲刷。当河床岩石比较完整、坚硬时，采用挑流鼻坎消能是比较经济和可靠的。当地质条件较差时，形成的冲坑应不影响主体建筑物的安全和下游岸坡稳定。当下游河道水深较浅，可考虑设二道坝以增加水垫深度，也可预挖消能塘以

控制冲坑发展。

(林可冀)

tongbu xitong

同步系统 (synchronization system) 将交流同步发电机投入电力系统或使电力系统与电力系统联网并列运行的装置。多台发电机、多个电力系统相互连接并列运行，不仅可以提高供电可靠性，而且可以使负荷分配更加合理，减少电力系统备用容量，达到经济运行的目的。然而，只有当待并双方以相同的电角速度旋转，彼此间的相角差不超过允许的极限值，归算电压近似相等时，才允许相互连接并列运行。同步方式有准同步和自同步两种。

准同步方式 采用准同步方式时，发电机并列前已励磁，在发电机的电压、角速度（或频率）、相角分别与投入系统的电压、角速度（或频率）、相角相同（或接近相同）时，合上发电机断路器完成同步并列操作。这种方式的投入瞬间，发电机的冲击电流为零或很小，不致于降低电力系统电压。但准同步装置较复杂，同步并列过程较长，尤其在电力系统事故而频率和电压急剧变化时，同步并列过程更长。如果由于某些原因造成非同步并列，严重时会导致发电机损坏。因此要严格控制准同步的条件。准同步有手动、自动和半自动三种。

准同步条件 准同步并列的条件是待并双方电压相等、频率相同、相位相同。实际上要绝对准确地达到这些要求是不可能的。在实际并列时相位、频率和电压往往均有一些差值，只是不应该超出允许范围。

(1)电压差的影响。如果发电机和电力系统的频率和相位相同而仅仅是电压在数值上不等时，在发电机投入电力系统瞬间将产生冲击无功电流，将引起发电机定子绕组发热，为此一般电压差的最大值最好限制在 5%~10%额定值的范围内。

(2)相位差的影响。如果发电机和电力系统的电压、频率相同而两者间的相位不一致，在发电机投入电力系统瞬间将产生带有有功性质的冲击电流并产生冲击电磁力矩。一般要求冲击电磁力矩不超过发电机出口三相突然短路时的数值，而冲击电流在定子绕组端部所引起的电动力不超过三相突然短路时的 1/2。按照这些要求和发电机不同的参数可计算得到准同步合闸时允许的极限相位差。对于无阻尼回路的水轮发电机，其计算结果的变化范围约为 23°~59°，对于有阻尼回路的水轮发电机，其计算结果的变化范围约为 20°~48°。

(3)频率差的影响。频率不完全相等会产生脉动电压和脉动电流，将引起刚投入电力系统的发电机带上



过多的正有功或负有功分量,使发电机轴上产生振动,严重时也可能失去同步。因此准同步允许的频率差为 $0.1\sim 0.4\text{ Hz}$ 。

手动准同步 待并一方所有并列操作,包括转速调节、电压调节和断路器合闸均由运行人员手动进行。为了进行手动准同步,装设了选择器件用来预先选定有同步并列任务的断路器。并装设同步表一只及检测断路器两侧并列时电压和频率的电压表和频率表各两只(也有只装电压差表和频率差表各一只)或者装设一只组合式同步表(除装有指示相角的同步表外,还装了能指示待并双方的电压差和频率差的表计),用来分别检测待并双方之间的相位、电压和频率。等到待并双方的相位、电压、频率接近相等时,手动合上选定的断路器,完成同步并列。

自动准同步 所有同步并列操作均由自动装置来完成。

(1)自动准同步装置的功能是当电压差、频率差超过允许范围时,能自动发出调节电压和频率的指令,促使同步条件得到满足。并在满足同步条件后,比相角差为零时提前一段时间发出合闸脉冲,提前的这段时间力求等于断路器的合闸时间,使得断路器合闸瞬间正是待并双方相角差为零的时刻,以期在断路器合闸瞬间发电机冲击电流最小。按提前发合闸脉冲的方式,自动准同步装置分为恒定导前时间和恒定导前相角两种类型。前者使提前发合闸脉冲的时间与断路器的合闸时间一致,不受滑差角速度的影响;后者是在某一恒定导前相角下发出合闸脉冲,其导前时间将随滑差角速度的变化而变化,只适用于合闸时间较短的断路器,由于该方式结构简单,多用在线路上同步并列。国内外得到广泛采用的是恒定导前时间的自动准同步装置。

(2)到目前为止,大部分水电站采用全厂装设1~2台自动准同步装置对所有发电机进行自动同步并列。其并列的步骤为:①如装有两台自动准同步装置,首先要选定哪一台参加同步并列。②操作待并的发电机的断路器同步选择器件,将待并发电机电压和电力系统电压加到自动准同步装置上。自动准同步装置投入工作后,根据发电机电压的高、低,发出降低电压或提高电压的指令,通过励磁自动调节器(见水轮发电机励磁)降低或提高发电机电压,使它与电力系统电压接近(某些自动准同步装置没有这一功能,发电机与电力系统电压的接近,仅由自动励磁调节器承担,它的缺点是,电力系统电压过低或过高时,需运行人员协助调节),根据机组转速高、低,发出减速或增速指令,通过水轮机调速器减少或增加机组的转速。当机组与电力系统的频率差缩小到给定值,自动准同步装置按给定的导前时间发出合闸脉冲,将断路器合上,使发电机

与电力系统同步并列运行。

(3)对于大容量的水轮发电机组已愈来愈多地采用每台机组装设一台自动准同步装置,作为水轮发电机组自动控制的组成部分,不需为同步并列进行附加的控制。因此,加快了同步并列过程,给进一步提高水电站自动化水平创造了条件。而且可按照发电机各自断路器的合闸时间准确地整定导前合闸时间。

半自动准同步 待并一方的频率和电压是由运行人员手动调节,在相角差为零前相当断路器合闸时间由自动准同步装置发出合闸脉冲,将断路器合上,完成同步并列。

自同步方式 自同步方式是在发电机组转速升高到接近电力系统转速时,将未加励磁的发电机投入电力系统,然后加上发电机励磁,将发电机拉入同步。因此并列过程短,尤其在电力系统事故低频率、低电压的情况下,能使发电机迅速并入电力系统,但在发电机投入电力系统瞬间,冲击电流大,使电力系统电压有较多的降低。因此自同步的条件也要控制。

自同步条件 中国 DL400-91《继电保护和安全自动装置技术规程》规定,采用自同步方式的发电机,应符合以下要求:

(1)定子绕组的绝缘及端部固定情况良好,端部接头无不良现象;

(2)自同步并列时,定子超瞬变电流的周期分量不超过允许值,一般不超过 $0.74/x''_d$ 倍额定电流。

自同步可分为手动、自动和半自动三种方式。

手动自同步 机组起动升速后,由运行人员监视发电机转速或监视发电机与电力系统间的频率差,当它达到允许数值时,手动合上发电机断路器,并随即手动合上发电机灭磁开关,使发电机加上励磁。手动自同步一般仅在发电机断路器只有手动合闸机构的小容量水轮发电机组上采用。

自动自同步 其同步过程包括在水轮发电机组自动控制程序之中,在机组起动过程中当发电机的转速接近额定值或发电机与电力系统间的频率差很小时,靠转速继电器或差频继电器动作自动合上断路器,随后自动加上发电机励磁,完成自动自同步并列。如果机组起动过程中当转速到达 $80\%\sim 90\%$ 额定值时,就自动合上断路器,断路器合闸后一般要延时 $1\sim 3\text{ s}$ 再加上励磁,即所谓延时给励磁的自动自同步。

半自动自同步 在同步并列过程中,发电机的转速或频率由运行人员调节到与额定转速或电力系统频率相接近时,由转速继电器或差频继电器动作合上发电机断路器,随后加上励磁。这种自同步方式在水电站很少采用。

发展趋势 随着技术的进步,同步装置尤其是自

动准同步装置得到不断改进和更新。早期的恒定导前时间的自动准同步装置是用电磁元件、二极管整流元件等组成的。电子技术的迅速发展、晶体管和集成电路组成的自动准同步装置已替代了早期的产品,20世纪70年代国外开始采用计算机同步。80年代以来在中国计算机同步的技术也得到迅速发展。计算机同步可以设置独立的计算机同步装置,配相应的数据采集和输出部件,这种方式用微机来实现;也可附设在机组自动控制的计算机远方终端内,作为它的一个子系统,配上适当的数据采集和输出部件来实现同步并列。计算机同步具有快速、准确的特点,将是今后发展的主要趋势。

近年来有些学者提出了水轮发电机快速跟踪同步。在水轮发电机组起动过程中,通过励磁调节器的作用使发电机电压跟踪系统电压,得到待并双方电压差为零或接近零;通过微机调速器使水轮发电机组的频率和相角跟踪电力系统的频率和相角,使得待并双方频率差和相角差为零或接近零,以得到最佳的同步条件。

(张德平)

Tongjiezi shuidianzhan

铜街子水电站 (Tongjiezi Hydropower Station)

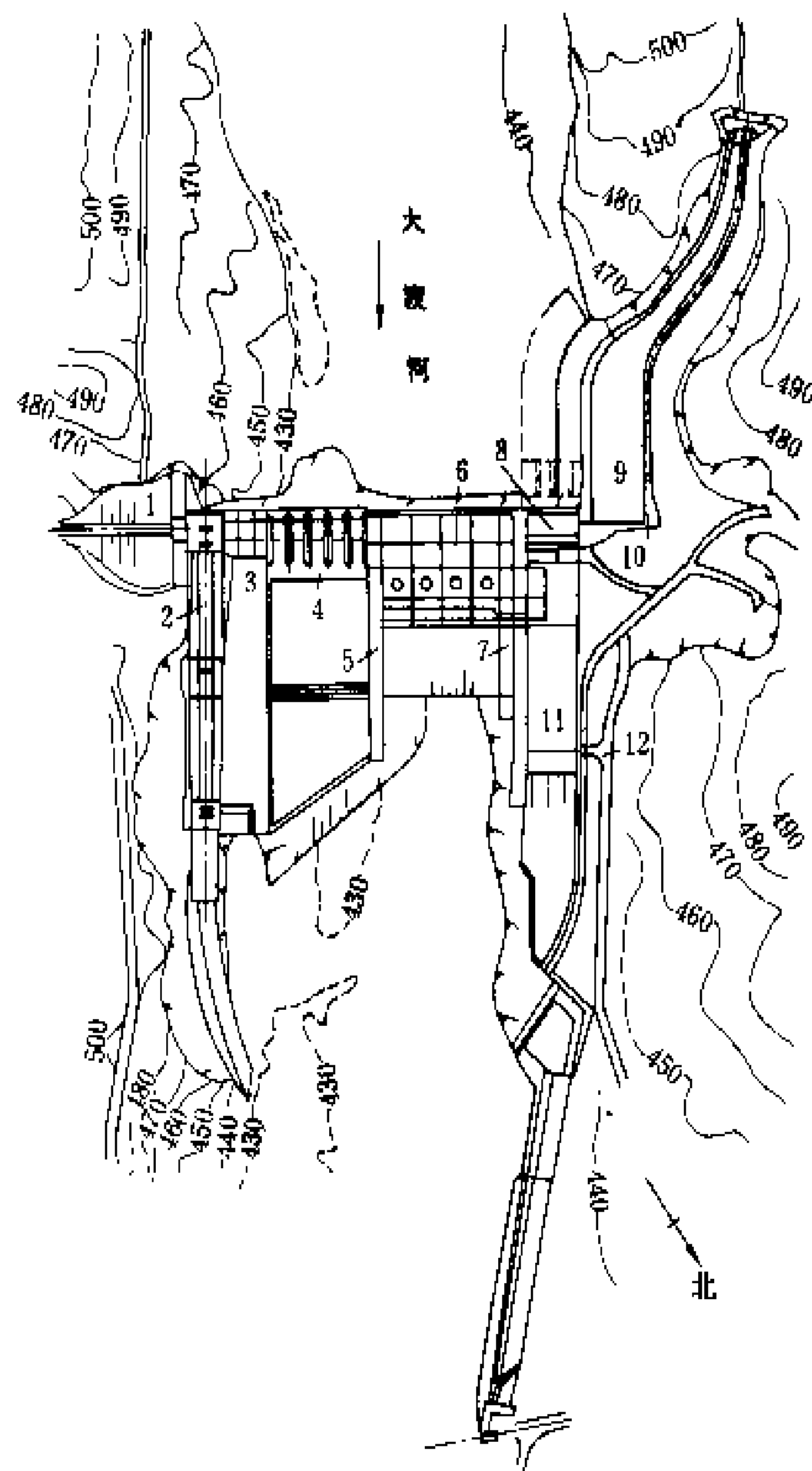
大渡河梯级开发,下游最后一级电站,位于四川省乐山市境内,距上游龚嘴水电站33 km,距成昆铁路轿溪车站17 km,以发电为主,兼顾漂木和下游通航。装机容量600 MW,保证出力130 MW,多年平均年发电量32.1亿kW·h。主坝为重力坝,最大坝高79 m。建成后纳入四川电力系统。工程于1985年开工,1992年12月第一台机组发电。

水文水库特性 坝址以上流域面积7.64万km²,多年平均流量1490 m³/s,多年平均年径流量473亿m³,五百年一遇设计洪水流量13100 m³/s,万年一遇校核洪水流量16400 m³/s。正常蓄水位474 m,设计洪水水位474.6 m,校核洪水水位477.7 m,汛期限制水位469 m,死水位469 m。总库容2.0亿m³,调节库容0.3亿m³,为日、周调节水库。

枢纽布置 见图。坝线总长1009.84 m。坝顶高程479 m。河床部分为混凝土重力坝,部分坝段采用碾压混凝土,左右两岸均为堆石坝接头,左岸为混凝土面板堆石坝,跨过左深槽,建于70 m深的覆盖层上,最大坝高50 m。右岸为钢筋混凝土心墙堆石坝,高32 m。溢流坝布置在河床右深槽上(5孔,14 m×17.5 m),采用底流消能,消力池长90 m。

河床右岸边布置过木筏闸,闸室宽14 m。采用两级筏闸,每级闸室长105 m。漂木在水库内集中,捆扎

成木筏过闸,年过坝量为80万m³。



铜街子水电站枢纽布置平面图

- 1 右岸堆石坝; 2 筏闸; 3 右岸挡水坝; 4 溢流坝;
5—右排沙底孔; 6—厂房; 7—左排沙底孔; 8—明渠;
9—左岸堆石坝; 10 左岸碾压混凝土坝; 11 开关站;
12—进厂公路

河床左侧为河床式厂房,长130 m,宽24 m,高76 m,安装4台轴流转桨式水轮发电机组,单机容量150 MW。水轮机额定水头31 m,最大水头40 m,最小水头28 m,转轮直径8.5 m,额定出力154 MW。发电机为空冷半伞式,额定电压13.8 kV,额定容量176.47 MV·A,额定功率因数0.85。引水道为混凝土矩形断面管道。厂房左右侧设有冲沙底孔(尺寸均为5 m×6 m)。副厂房与主变压器布置在尾水平台上,4台三相主变压器,每台额定容量为180 MV·A。电压220 kV出线4回,并留有2回500 kV出线位置。

坝基处理 坝区地质条件复杂。出露地层为上二叠系峨眉山玄武岩和沙湾组砂页岩。大坝建基面以下分布有连续的软弱夹层及层间错动带,断层、裂隙发育。河谷左右各有1个深槽。左深槽深70 m,宽40 m,覆盖层中有20 m厚的砂层。右深槽深30 m,宽80 m。

谷底分布有4条断层,斜贯整个枢纽区。

左岸混凝土面板堆石坝,跨越左岸深槽。为解决深厚覆盖层承载能力和防渗问题,在其上游挡墙(即导流明渠左边墙)下设2道厚1m的混凝土防渗墙,截断深槽覆盖层,2道防渗墙间设有5道横隔墙,形成覆盖层中的空间格架,在挡墙建基面下20m内,设置钢筋笼。为解决细沙层液化问题,采用75kW大功率振冲器,穿透漂卵石层,形成振冲桩加固细沙层。混凝土主坝坝基下有倾向下游 $6^{\circ}\sim 8^{\circ}$ 的缓倾角泥化夹层,采用压力为30MPa的高压旋喷水泥灌浆工艺,置换泥化夹层。

工程施工 主要工程量为:土石方明挖450万 m^3 ,土石方回填253万 m^3 ,混凝土浇筑273万 m^3 ,钢筋钢材7.39万t。

施工导流采用断流围堰,在左岸挡水坝段设置导流明渠。明渠左挡墙及出口部分处于碎石土和砂卵石层地段,采用21个尺寸为 $30\text{m}\times 16\text{m}\times 26\text{m}$ (长 \times 宽 \times 高)的大沉井作为明渠左挡墙。明渠右侧重力式导墙座落在弱风化细长柱状节理玄武岩上,岩层节理发育,有倾向河床的层内错动带及缓倾角裂隙等软弱层,采用36根单根336吨位的预应力锚束和阻滑板的地基加固处理方案。

场外交通采用公路运输。

设计和施工单位 成都勘测设计院设计,水利电力部第七工程局施工。

(傅华玲)

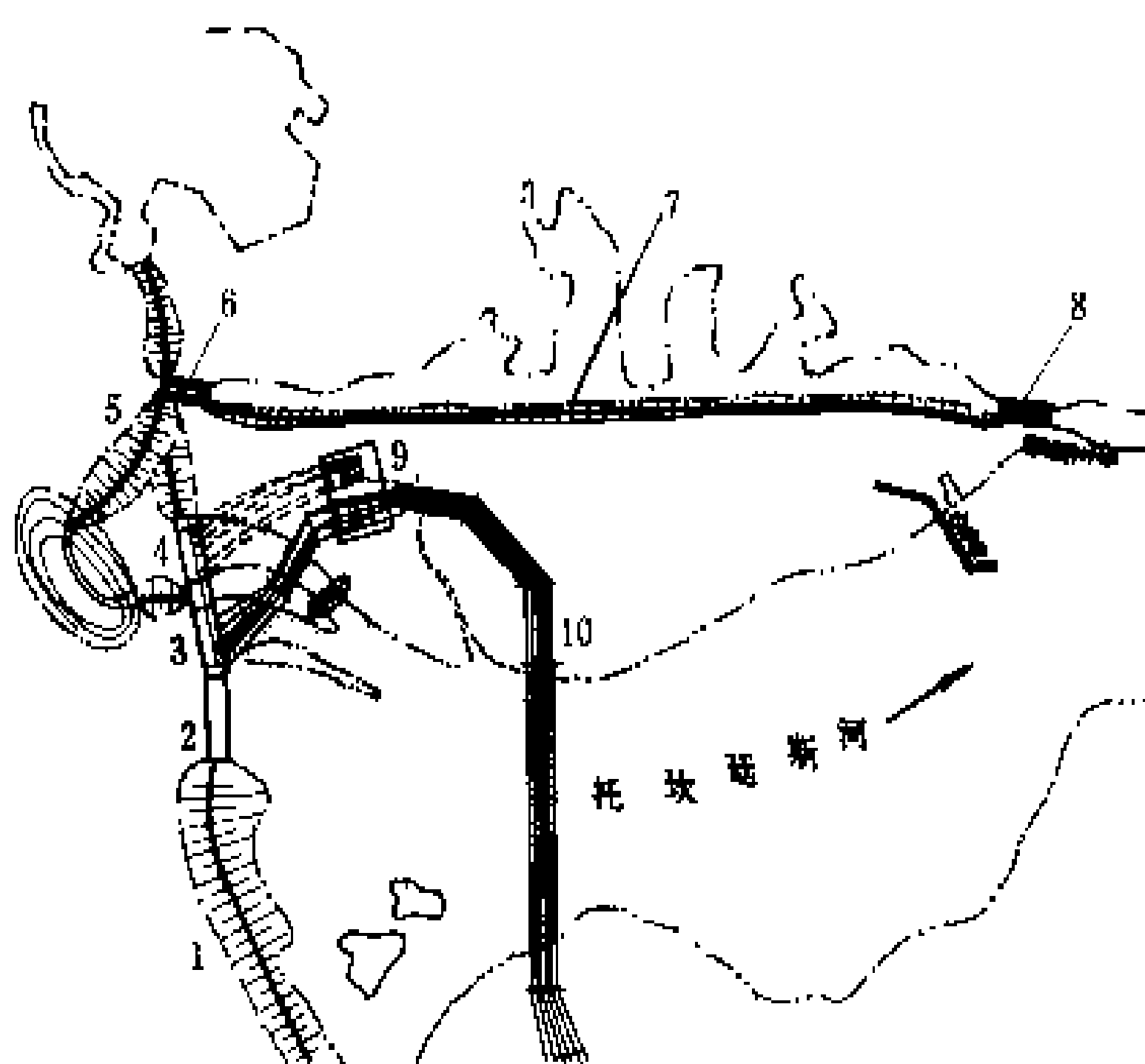
Tukuluyi shuidianzhan

图库鲁伊水电站 (Tucurui Hydropower Station) 位于巴西北部亚马孙地区托坎廷斯(Tocantins)河下游,距贝伦港320km。设计装机容量7960MW。初期装机4000MW,年发电量228亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。主要为开发当地铁矿和铝矾土等资源就近供电,并用500kV超高压输电线路北送贝伦市,东与圣弗兰西斯科电力系统相联。主坝为斜心墙堆石坝,最大坝高98m。工程于1974年开始施工准备,1975年11月主体工程开工,1984年发电,1990年完成装机4000MW,总工期16年。

水文和水库特性 托坎廷斯河与世界最大的亚马孙河在同一地区注入大西洋。本流域属赤道附近的热带雨林区,森林茂密,平均年降水量1500~2000mm。坝址以上流域面积75.8万 km^2 ,多年平均年径流量3470亿 m^3 ,多年平均流量11000 m^3/s ,实测最大流量68400 m^3/s ,设计洪水流量100000 m^3/s 。正常蓄水位72m,库容458亿 m^3 。死水位58m,调节库容254亿 m^3 ,库容系数 β_1 为0.07,可进行季调节。正常蓄水位

时,水库面积2430 km^2 。移民人口很少,但淹没大面积森林,清理困难,成为主要环境问题。正常尾水位3.96m。

枢纽布置 坝址基岩为变质沉积岩,河床中顺河方向有区域断层。挡水前沿总长7810m。在跨越河床断层部分为斜心墙堆石坝,长1310m,最大坝高98m,接右岸土坝长2611m。河床左侧为混凝土溢流坝段,长580m,最大坝高86m。设23孔弧形闸门控制的溢流孔,每孔宽20m,高21m,在正常蓄水位时泄洪100000 m^3/s ,超高至74m水位时可泄洪110000 m^3/s 。溢流坝段的左侧为初期厂房坝段,长400m。初期厂房左端与上游小山包连成的纵向堆石坝,长460m。左岸堰口建土坝长2330m。留有兴建两级船闸的位置。在土坝中部设上级船闸,下接错船道,长5643m,宽140m,再接下级船闸。两级船闸的闸室净宽33m,长210m,提升高度分别为37.8m和35m。以后续建时,在初期厂房坝段的左侧接建二期厂房。另建土坝与上级船闸相接。枢纽布置见图。



图库鲁伊水电站枢纽布置图

1—河床堆石坝;2—溢流坝段;3 初期厂房坝段;4—预留二期厂房坝段;5—左岸土坝;6—上级船闸;7 错船道;8—下级船闸;9 开关站;10—输电线

机电设备 初期厂房内安装12台中水头混流式水轮发电机组。压力钢管直径10.4m。水轮机转轮直径8.1m,转速83.7r/min,额定水头60.8m时出力316MW,流量576 m^3/s ;最大水头67.2m时出力333MW;最小水头51.4m时出力250MW。发电机额定容量350MV·A,功率因数0.95,频率60Hz,电压18kV。每台发电机配1台三相变压器,容量350MV·A,升压至500kV。厂房内还安装2台厂用机组,每台20MW。

工程量和投资 不包括船闸工程的工程量;开挖



土方 2160 万 m^3 , 开挖石方 2290 万 m^3 , 填筑土方 5160 万 m^3 , 填筑堆石 1980 万 m^3 , 浇筑混凝土 600 万 m^3 。1980 年估计初期工程投资 30 亿美元, 单位投资 750 美元/kW。

(陆钦侃)

tu de gongcheng fenlei

土的工程分类 (engineering classification of soil)

将自然界的土归纳为工程性质类同的土类, 以定性了解其工程性质的方法。土的类别根据土的物理性指标和目测鉴定。分类方法因工程目的不同而不同, 采用较广泛的有统一分类法、公路土壤分类法和地基土分类法, 还有三角坐标分类法和塑性指数分类法等。

土的物理性指标 包括反映土的固有性质的颗粒级配、土粒比重、界限含水量(液限、塑限、缩限)、塑性指数、活动度等指标, 以及反映土的密实和含水状态的密度(或容重)、含水量、液性指数、饱和度、相对密度等指标。其中颗粒级配、液塑限含水量、塑性指数等项指标常被用作土的工程分类的依据。

(1) 颗粒级配。土中不同直径的颗粒重量占土粒总重量的百分数, 用颗粒大小分布曲线表示。由曲线可确定土中的砾、砂粒、粉粒和粘粒等各粒组的重量百分数。应用较广的粒组划分方法是: 粒径 60~2 mm 为砾; 2~0.05 mm 的为砂粒; 0.05~0.005 mm 为粉粒; <0.005 mm 为粘粒。有些标准取 0.075 mm 为砂粒和粉粒的界限粒径。土中所含粒组愈多, 则级配愈好。评价级配好坏的主要指标为不均匀系数 $C_u = d_{60}/d_{10}$, 其辅助指标为曲率系数 $C_c = d_{30}^2/d_{60} \cdot d_{10}$, 式中 d_{60} , d_{30} , d_{10} 为粒径, 小于此粒径的土颗粒重量分别占土粒总重量的 60%, 30%, 10%。

(2) 液塑性。在粘性土水分逐渐减少的过程中, 土从流态变成可塑状态, 继而变成不可塑状态的两个界限含水量分别为液限含水量 w_l 和塑限含水量 w_p , 两者统称阿太堡 (Atterberg) 界限。液限和塑限含水量之差为塑性指数 I_p 。土中粘粒含量和活动度愈高, 则液限和塑性指数愈大。土的天然含水量与塑限含水量之差与塑性指数的比值为液性指数。

统一分类法 根据土中的主要粒组、级配及液塑限含水量而分类。分类的原则是: ①土中砂粒和砾的含量超过 50% 的称粗粒土, 粉粒和粘粒含量超过 50% 的称细粒土; ②粗粒土按砂粒和砾的含量和级配分成级配良好或不良的砾和砂砾、级配良好或不良的砂或砾质砂、粉土或粘土质砾、粉土或粘土质砂等 8 类; ③细粒土按液限、塑性指数和有机质含量分成无机粉土、弹性粉土、中低塑性粘土、高塑性粘土、有机低塑性粉土、

有机中高塑性粘土、泥炭等 7 类。这 15 类土经常规方法压实后的抗剪强度、压缩性、加州承载比以及易施工性等特性, 可通过颗粒分析和液塑限等简单试验作出定性评价。甚至可以在现场通过目测、湿土在手掌中的摇振反应以及干土块在手指间的压碎强度等简便方法鉴别土类, 从而定性估计土料性质和对土料进行初选。

公路土壤分类法 按土的承载车轮能力、遇水膨胀、干缩、冻胀等筑路材料性质而分类的方法。将粉粒和粘粒总含量等于或小于 35% 的土称为粒状土料, 而含量大于 35% 的称为粉细土料。前者按土中含砾量分为 3 类, 后者按液限含水量和塑性指数分为 4 类。从粗到细称为 A-1~A-7, 共 7 大类。

地基土分类法 既考虑土中主要粒组含量, 又注意到密实和饱和状态的分类法, 并与估计地基土的承载力相联系。对无粘性土, 按相对密度和饱和度分类, 相对密度愈高, 饱和度愈低, 则承载力愈高。对于粘性土, 按塑性指数和液性指数分类, 塑性指数和液性指数愈大, 则承载力愈小。

参考书目

Singh A. Soil Engineering in Theory and Practice.
New York: Asia Publishing House, 1976

(陈愈炯)

tu de gujie yu chenjiang

土的固结与沉降 (consolidation and settlement of soil)

固结是饱和土体在应力作用下, 水从孔隙中排出, 压缩变形量随时间而增长的全过程。沉降是在应力作用下土体发生压缩或剪切变形而引起的垂直位移。在饱和土固结过程中, 开始作用的应力全部由孔隙水所承担, 随着孔隙水的排出和体积的压缩, 土中超孔隙水压力消散, 粒间有效应力相应增长, 直至超孔隙水压力全部转化为有效应力为止。固结的快慢取决于土的渗透性和排水条件, 透水性低、排水途径长则固结过程慢。所有粗粒土和低饱和度的细粒土, 在应力作用下的应变是瞬时产生的, 固结过程极快; 而对饱和或接近饱和的细粒土则需考虑固结过程中其力学性质的相应变化。

土的固结

(1) 主固结与次固结。主固结即渗透固结, 是超孔隙水压力消散和有效应力增长的过程。在主固结基本结束后, 在有效应力基本不变情况下, 由于土骨架蠕变而引起的缓慢体积压缩过程称为次固结。对软粘土、淤泥等土层, 次固结效应引起的沉降量可占很大比重, 不可忽视。

(2) 先期固结压力和超固结比。土体内某点在历史上曾经受过的最大垂直压力称为先期固结压力 p_c , 可

以从压缩试验的 $e-\log p$ 曲线上求得。它和该点现在作用的有效垂直压力 p_0 之比称为超固结比 OCR。OCR 值的大小表示土的不同固结历史：OCR=1 为正常固结，表示土体在上覆土重压力下正好完全固结；OCR>1 为超固结，表示土体在历史上曾承受过的最大压力超过现存的上覆土重压力；OCR<1 为欠固结，表示土体在上覆土重压力下尚未完全固结。这 3 种不同固结历史的土的固结和压缩特性有很大差别。

(3) 固结理论。用于进行土体在应力作用下孔隙水压力消散过程的计算。常用的是 K. 太沙基 (K. Terzaghi) 的单向固结理论，它假设：土是均质、饱和的；土骨架和水是不可压缩的；固结过程中土的渗透系数 k 和压缩系数 a 为常数；渗流服从达西 (H. - P. - G. Darcy) 定律；载荷瞬时施加；只能沿垂直方向排水和发生压缩。由此导出固结微分方程

$$C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

方程的解为

$$u = f(T_v, z) \quad (2)$$

式中 u 为研究点的超静水压力； z 为研究点在地面以下深度； t 为瞬时加载后经历的时间； $C_v = k(1+e_1)/(\gamma_w a)$ 为固结系数， γ_w 为水的容重， e_1 为土层固结前的初始孔隙比； $T_v = C_v t/H^2$ 为时间因子， H 为最大排水距离（单面排水时为土层厚度，双面排水时为土层厚度之半）。用上式解出某一时刻 t 时 z 深度处某点的孔隙水压力 u_z ，根据固结前的起始孔隙水压力 u_{z0} ，可计算 t 时刻该点的固结度 u_z 和整个土层的平均固结层 \bar{u}_t 。

$$u_z = \frac{u_{z0} - u_z}{u_{z0}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\bar{u}_t = \frac{\int_0^H (u_{z0} - u_z) dz}{\int_0^H u_{z0} dz} \times 100\% \quad (4)$$

M. A. 比奥 (M. A. Biot) 于 1941 年提出了三向固结理论。该理论考虑了三向变形、三向排水条件及土体内主应力和为非常数的特点，将变形和渗流耦合而得出精确解。由于计算十分繁复，仅在近代计算技术和电子计算机发展的条件下，三向固结理论才开始用于工程实践。K. 太沙基假定在恒定外荷重下土体内任一点的主应力和不变，导出简化三向固结微分方程，并求得近似解。

土体沉降 土体在应力作用下发生的垂直变形，可以分为瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降。瞬时沉降为加荷瞬间因剪切变形而引起的沉降，主固结沉降和次固结沉降则相应于主固结和次固结过程中发生的沉降。一般粘性土层以主固结沉降为主，砂性土层固结

很快，瞬时沉降和主固结沉降区分不开。计算的沉降量和不均匀沉降必须小于各类建筑物的允许值，以保证安全和正常运行。

最常用的沉降计算方法是基于弹性理论的分层总和法，即土层的总沉降量 S 等于各分层沉降量 S_i 之和。

$$S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} H_i \\ = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{1 + e_{1i}} (p_{2i} - p_{1i}) H_i \quad (5)$$

式中 H_i 为 i 层土的厚度； $a_i = -\Delta e / \Delta p = (e_{1i} - e_{2i}) / (p_{2i} - p_{1i})$ ，为 i 层土的压缩系数； e_{1i} 、 e_{2i} 、 p_{1i} 、 p_{2i} 分别为 i 层土起始和终了时的孔隙比和垂直有效压力，由压缩试验的 $e-p$ 曲线得出。由于土体沉降一般具有三向性质，不考虑侧向变形的分层总和法计算结果往往与实测值有较大差别，有必要加以修正。中国黄文熙提出考虑土体侧向变形影响的沉降计算公式

$$S = \sum_{i=1}^n K_{si} S_i \quad (6)$$

$$K_{si} = \frac{1}{1 - 2\mu} \left[(1 + \mu) \frac{\sigma_z}{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z} - \mu \right] \quad (7)$$

式中 K_{si} 为考虑侧向变形的沉降计算修正系数；A. W. 斯肯普顿 (A. W. Skempton) 和 L. 贝伦 (L. Bjerrum) 提出考虑三向应力状态对初始孔隙压力分布影响的沉降计算修正系数 λ ，它与压缩层相对厚度和孔隙水压力系数有关。

(李锦坤)

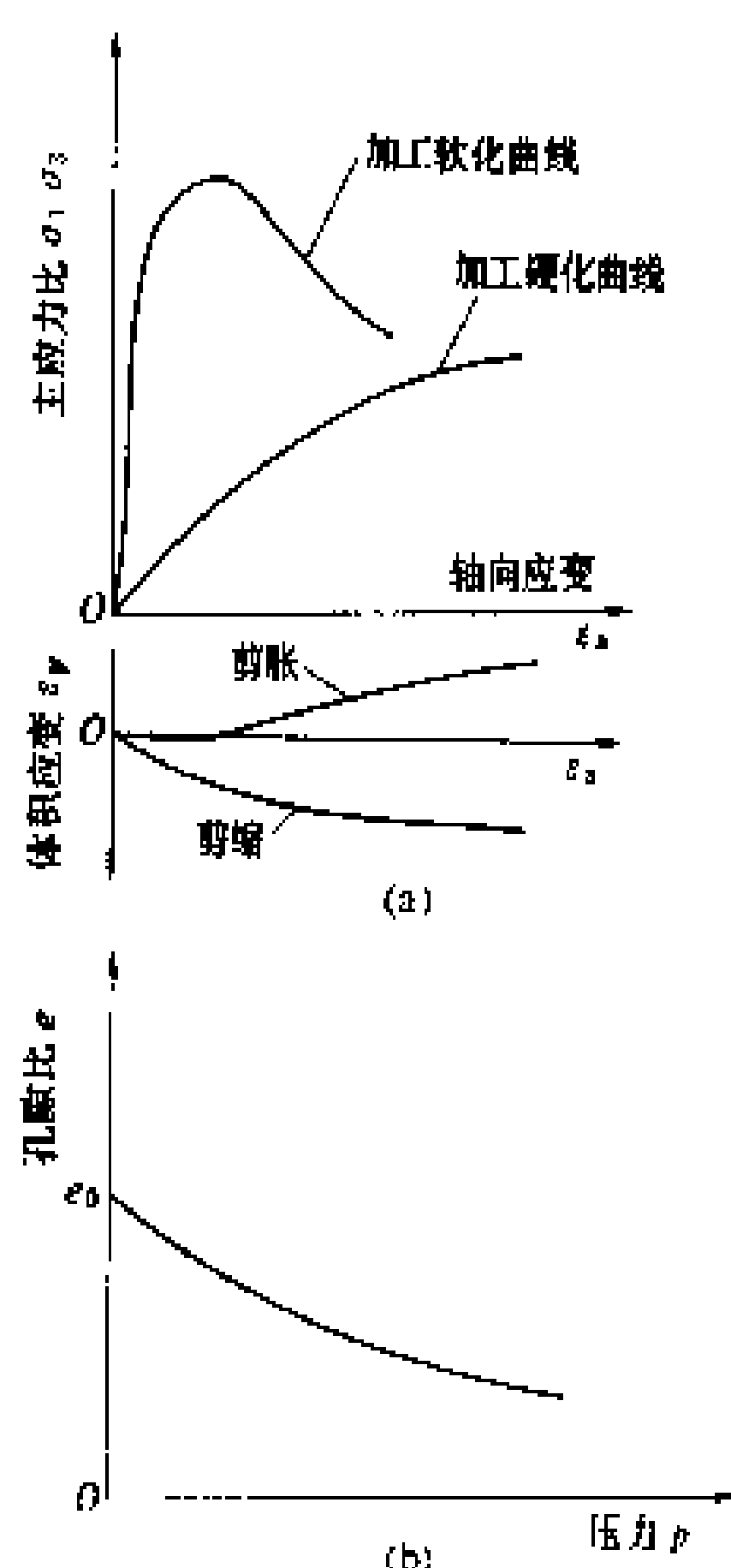
tu de lixue xingzhi

土的力学性质 (mechanical properties of soil)

土在外力作用下骨架的应力、应变、强度和时间的相互关系和土中孔隙水、气的变化特性。土是碎散矿物颗粒的集合体，随颗粒间的滑动、滚动、重新排列和压碎而使土体变形和破坏，因而土的应力-应变-强度关系远较其他工程材料复杂。土的强度是土在外力作用下达到破坏时的应力，其破坏形式包括剪切破坏、拉伸破坏等。土的应力-应变关系决定土工建筑物和地基基础的位移、沉降；而土的强度则控制地基承载力及堤坝、基坑和天然土坡等边坡稳定性。土的力学性质还包括土的渗透性（见渗流）及动力性质（见土动力学）。1923 年 K. 太沙基 (K. Terzaghi) 发现了确定土的力学性质的有效应力原理，将土的主要力学性质，如应力-应变-强度-时间等相互联系起来，并有效地用于解决土工问题。土的力学性质指标主要是通过各种室内土工试验确定，也可用原位测试方法在现场测定。



土的应力-应变关系 土的应力-应变关系具有非线性、弹塑性和剪胀性等主要特点,且应力水平、应力路线和应力历史对其有显著的影响。图1为常用的三轴剪切试验和压缩试验中得出的两种应力-应变关系曲线。三轴剪切试验是在一定的周围压力下施加轴向载荷直至试样破坏,试样可以发生竖向、侧向和体积变形;压缩试验是将试样放在刚性容器内施加轴向载荷,试样可以发生竖向和体积变形,但无侧向变形。



(1)非线性。应力与应变间呈明显的非线性关系。图1 土的应力-应变关系曲线。三轴剪切试验中,松砂或正常固结土的应力-应变关系为单调增加,这种类型的曲线称为加工硬化曲线;而密砂或超固结土的应力-应变关系是有驼峰的曲线,这种类型曲线称为加工软化曲线。

(2)弹塑性。表现为土体卸载荷时,除可恢复的弹性变形外,还存在不可恢复的塑性变形。随着变形加大,塑性变形在总变形中的比例增加。对加工硬化曲线,其屈服应力随应变增加而加大;对加工软化曲线则相反。

(3)剪胀性。土在纯剪切力作用下体积将发生变化:松砂或正常固结土的体积将收缩;而密砂或超固结土的体积开始略收缩,随即膨胀。这是土区别于其他工程材料力学性质的主要特征。

(4)应力水平。既是指土的抗剪强度被动员起来的水平,也指周围压力水平。三轴剪切试验时的应力-应变关系的初始切线模量和强度值随周围压力加大而增加,有时甚至应力-应变曲线的线型也会随之而改变。

(5)应力路线。土体中某单元在外载荷作用下的应力变化过程在应力空间的轨迹。土的应力-应变关系与应力状态和达到这个应力状态的应力路线有关。土的应力-应变关系在一种应力路线时为加工硬化曲线;而在另一应力路线时,可能变化为加工软化曲线并产生

剪胀。

(6)应力历史。在测试土样的应力-应变关系之前,试样已经受的各种应力状态。土有记忆其应力历史的特性。现场土样在历史上受到过的最大压力(p'_c)小于、等于或大于目前土的上覆压力(p'_0)时,分别称为欠固结土、正常固结土和超固结土。 p'_c 与 p'_0 的比例值称为超固结比,它对土的应力-应变关系的影响很显著。

此外,土的各向异性、中主应力、主应力轴旋转、加荷速率等因素都影响着土的应力-应变关系。

土的抗剪强度 土在外力作用下达到剪切破坏时的剪应力。破坏应力与应力状态有关,根据应力-应变关系确定。破坏面上的剪应力 τ_f 是该面上法向应力 σ 的函数, $\tau_f=f(\sigma)$,将它画在 σ - τ 应力空间,得到的这条曲线称为莫尔(O. Mohr)强度包线,常用库仑(C. - A. de Coulomb)直线方程 $\tau_f=c+\sigma \tan \varphi$ 来表示(见图2)。c、 φ 为抗剪强度指标,分别称为土的粘聚力和内摩擦角。强度包线也可用非直线方程表示。决定土的变形、强度特性的不是作用在土体上的总应力 σ ,而是作用在土颗粒间的有效应力 σ' 。莫尔-库仑破坏条件可写成 $\tau_f=c'+\sigma' \tan \varphi'$,其中 c' 、 φ' 为有效应力抗剪强度指标。 c' 、 φ' 和c、 φ 分别用于土坡稳定的有效应力和总应力分析中。中主应力、土的各向异性等对土的强度有明显影响。粗颗粒土等常在高应力下呈现非线性的 τ - σ 关系。

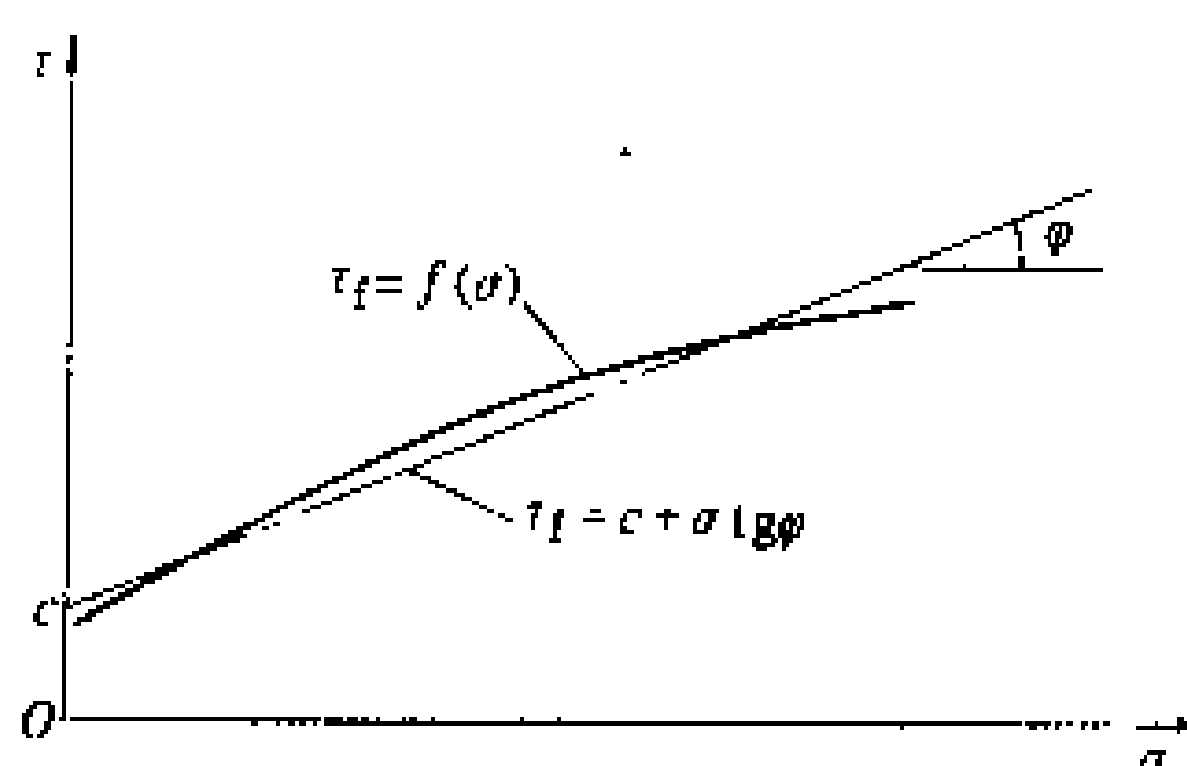


图2 莫尔-库仑强度包线

参考书目

黄文熙主编. 土的工程性质. 北京: 水利电力出版社. 1983

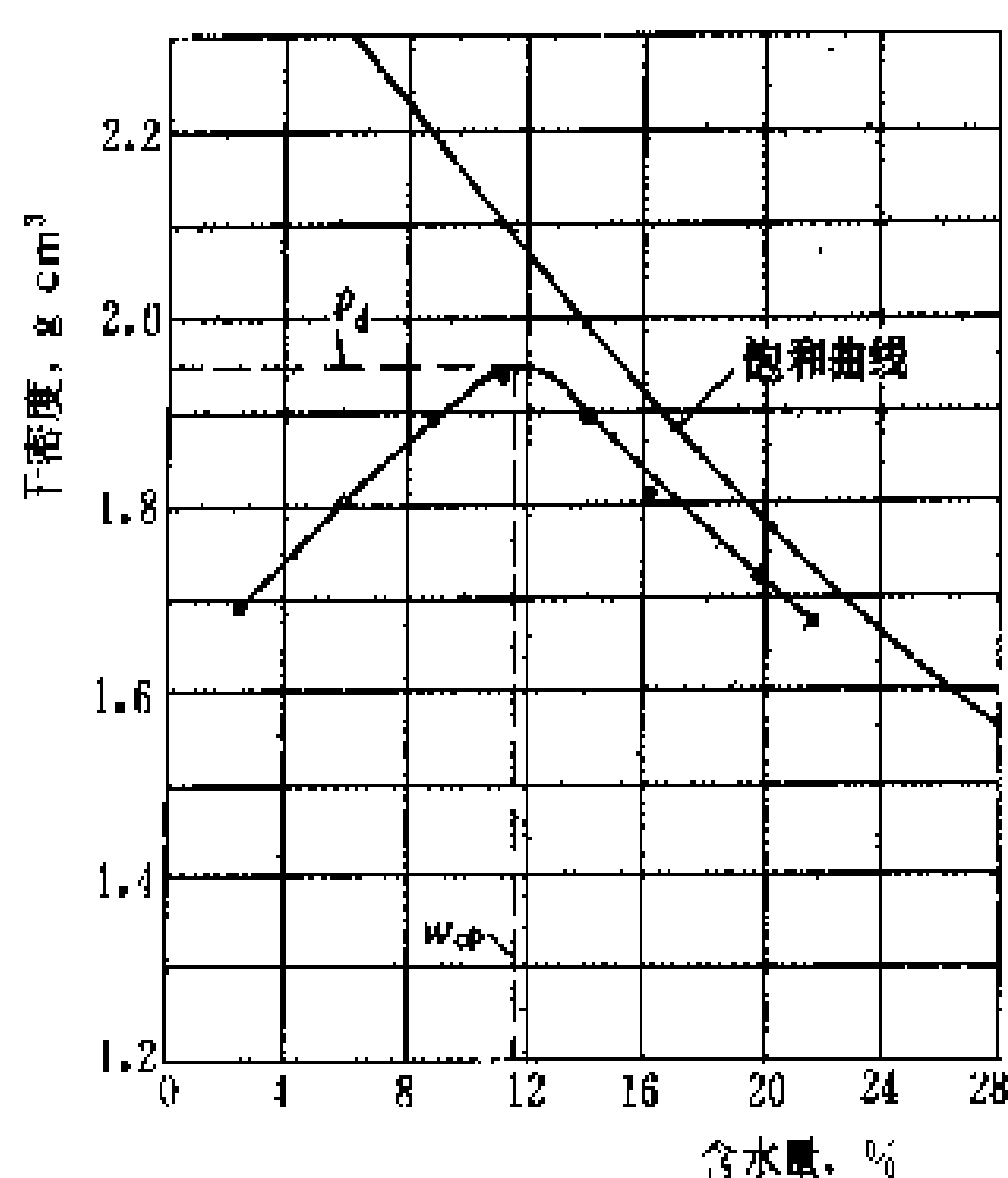
(濮家骥)

tu de yashi

土的压实 (soil compaction) 在松散土上施加重复荷重,使土颗粒间的孔隙减小,密度增加的工程措施。土压实后,强度增加,压缩性减小,抗渗性能提高,改善了土的工程性质。早在远古时代,人类已开始用土作为建筑材料,在实践中逐步认识到土的压实的重要性。据中国《管子·度地》记载,在战国时期

(公元前 5~前 2 世纪), 治河民工工具中已有夯实工具。近代随着土坝建设的发展, 土的压实技术逐步提高。1933 年美国工程师 R. R. 普洛克特 (R. R. Proctor) 总结了美国修建土坝的经验, 全面系统地阐明了土的压实原理, 提出试验室击实试验方法, 自此土的压实理论在填土建筑物的设计和施工中得到普遍应用。

土的压实性 粘性土的压实干密度与含水量有密切关系。将一定的粘性土制备成不同含水量的试样, 用一定的压实方法和压实功能进行击实试验, 得出含水量与干密度的关系曲线, 亦称压实曲线, 干密度的峰值称最大干密度 ρ_d , 相对应的含水量称最优含水量 w_{op} (见图)。用相同的压实方法和压实功能进行试验, 随土类不同, 测得的最大干密度和最优含水量有显著差别。



粘性土的压实曲线

最大干密度 $\rho_d = 1.96 \text{ g/cm}^3$; 最优含水量 $w_{op} = 11.6\%$

无粘性土(比如能自由排水的砂和砂砾石)压实干密度虽也与含水量有关, 但不存在最优含水量, 一般完全干燥或饱和时压实干密度最大, 而中间潮湿状态明显降低。一般粒径小于 0.075 mm 的细粒含量小于 $5\% \sim 12\%$ 的能自由排水的无粘性土, 需作相对密度试验, 用振动法求其最大密度。

压实功能 土的最大干密度、最优含水量与压实功能有关。随压实功能的增加, 最大干密度增加而最优含水量减小。目前各国击实试验采用的功能不尽相同, 主要有标准普氏和修正普氏两种, 其击实功能分别为 594 kJ/m^3 及 2669 kJ/m^3 。前者采用较多。

压实机械 原始的压实工具有木夯、石碾等。近代压实机械向多品种、高效率发展。以静重压实为主的有平碾、羊足碾、凸块碾、气胎碾等。利用冲击荷重压实的有夯板、电动夯、爆炸夯等。利用振动压实的有振动碾、平板振动器等。振动碾又可分为振动平碾、振动羊

足碾、振动凸块碾等。应根据土石料的不同性质, 选择适宜的压实机械。一般粘性土、砾石土可采用羊足碾、凸块碾、气胎碾、振动凸块碾; 砂或砂砾石可采用振动平碾、气胎碾、夯板; 堆石可采用振动平碾。近代趋向于采用高效率的振动凸块碾和振动平碾。

现场碾压试验 用于确定土石料的填筑标准和施工时的压实参数。(见土石坝材料现场试验)

(杨荫华)

tu de yuanwei ceshi

土的原位测试 (in-situ soil test) 为测定原位土的工程性质所进行的现场试验。土的性质测定有采取土样作实验室试验和现场原位测试两种基本方法。前者经过取样、封装、运送、储存、制样、试验等过程, 原状土样将受到不同程度的扰动, 特别是砂质土, 采取原状土样很困难, 因此往往要用原位测试方法确定土的力学性质以及鉴定和划分土层。有些原位测试方法可减少因采取土样导致的应力释放影响, 有些方法还可用于填土的质量检测。常用的原位测试方法有载荷试验、标准贯入试验、十字板剪切试验、静力触探、动力触探、旁压试验、跨孔波速试验等。此外, 用物探法进行土层勘探、用抽水注水试验测定土层渗透性、混凝土板抗滑试验、现场大型剪切试验、钻孔中扁千斤顶试验、放射性同位素测定土的密度及含水量以及桩基试验等, 从广义上也都属于土的原位测试。原位测试的推广和改进对岩土工程有重要作用, 受到了各国岩土工程界的重视, 方法趋向多种化, 操作和记录系统趋向自动化。

载荷试验 将一定尺寸的载荷板放在试坑或钻孔底面上, 逐级加载, 测定载荷和垂直位移的关系曲线, 确定地基土的变形特性和承载力。载荷试验按测试深度分为浅层与深层两种; 按板的形状分为平板与螺旋板; 按载荷性质分为静力和动力。常用的是浅层平板载荷试验。根据试验成果可评价地基土的允许承载力, 计算均匀地基土的变形模量, 确定非自重湿陷黄土的湿陷起始压力等。

标准贯入试验 用 $63.5 \pm 0.5 \text{ kg}$ 的穿心锤, 以 $0.76 \pm 0.02 \text{ m}$ 的自由落距, 将标准贯入器先打入土中 0.15 m , 然后记录继续打入 0.30 m 所需的锤击数, 即为标准贯入击数 N 。根据 N 值的大小可判断砂土的密实程度或粘性土的稠度, 用来确定地基土的允许承载力, 评定砂土液化可能性和估计单桩承载力, 并可确定土层剖面, 采取扰动土样进行物理性质试验。

十字板剪切试验 用插入软粘土的十字板头, 以一定速率施加扭转力矩, 按十字板内土柱剪断时的扭矩换算其抗剪强度值, 该值相当于内摩擦角 $\varphi_s = 0$ 时



的凝聚力 C_u 值。本试验方法适用于测定软粘土的不排水总抗剪强度和残余抗剪强度。

静力触探 将圆锥形探头按一定速率匀速压入土中,同时量测由锥头阻力和侧壁摩阻力形成的贯入阻力。可用于划分土层,评价地基土的工程特性,探找桩基持力层,预估沉桩可能性和单桩承载力,并可用于检验人工填土密度及地基加固效果。静力触探可以迅速连续地反映土层变化特性,探头装上特殊传感器可同时测量孔隙水压力。对于卵石层及夹有较多砖瓦、贝壳、礓石的土层,静力触探不适用。

动力触探 利用一定的落锤能量,将与探杆连接的探头打入土中,根据打入的难易程度(以贯入度或贯入阻力表示)判断土的工程性质。一般用于确定各类土的允许承载力,查明土层在水平和垂直方向的均匀程度;确定桩基持力层的位置和单桩承载力。动力触探分为轻型、重型和超重型3种。轻型适用于粘性土、素填土;重型用于中、粗砾砂和碎石土;超重型适用于卵石、砾石类土。

旁压试验 分预钻式及自钻式。一般采用预钻式,在预先钻就的钻孔内放入可向四周扩张的圆柱形旁压器,加液压使弹性膜对孔壁施加压力,使土体产生变形。根据旁压曲线可确定地基承载力和旁压模量。自钻式旁压仪是借圆柱形旁压器下端的钻刃用循环液冲孔或其他方法将旁压器沉置于钻孔中拟测试的位置进行试验。它适用于淤泥、砂等难以保持钻孔孔壁稳定的土层,其结构及操作较复杂。

跨孔波速试验 在按直线排列的3个或3个以上的钻孔内,在振源孔激振,在检波孔内接收直达波,测定压缩波和剪切波在地层中的传播时间,根据传播距离计算地层中波速及各项动力参数。

(曹健人)

tu donglixue

土动力学 (soil dynamics) 研究在各类动载荷(冲击载荷、周期载荷和不规则循环载荷)作用下土的性状,土体的动力反应,结构物土基和土工建筑物的振动、变形和稳定问题的一门学科。研究对象主要有土的动力特性、土体动力反应分析和动态测试技术3方面,还包括各种减振、隔振措施。

土的动力特性 动载荷作用下土的变形和强度特性。①土的动变形特性,指动载荷作用下土的应力-应变特性。在低应变幅($\leq 10^{-4}$)下它接近于粘弹性,常用动模量和阻尼比作为特性参数。②土的动强度,通常指产生某一特定破坏应变的冲击应力或一定循环次数的动应力幅。土的动强度有时间效应(如加载速率、持续时间等)。在动载荷作用下土中孔隙水压力的发展和

消散特性是研究动强度的一个关键因素。土的液化是土的动强度研究中的一个重要问题(见土体液化)。

土体动力反应分析 对动载荷作用下结构物土基与土工建筑物等土体的振动、应力与变形进行分析,包括土体与相邻建筑物相互作用的分析。诸如:机器基础振动分析,地震、波浪和爆炸等动载荷作用下的土体反应分析,土压力和土基承载力分析等。分析方法要根据动载荷特性和土体与建筑物特性来选用。低应变幅的问题可以用弹性波传播理论分析;一些简单的振动问题可用集总质量体系理论分析;对于重要和复杂的问题,用有限元法等数值分析方法。土体动力反应分析结果的可靠性取决于所选用方法、模式和有关的土的参数的合理性。

土的动态测试 在动载荷作用下对土的应力、应变和孔隙水压力以及土体的位移、速度、加速度和土压力等进行测试,研究内容包括测试理论、设备和技术。用于测试土的动力特性的方法有:现场波速测试(压缩波、剪切波和表面波),室内的共振柱、循环三轴、循环单剪、循环扭剪和波速测试等,各适用于不同的应力条件和应变幅范围。振动模型试验,特别是离心机上的振动试验,对于探讨土体动力反应和动态破坏机理有重要作用(见土工模型试验)。原型建筑物的入工激振试验,特别是实际动力作用下的原型观测,对于验证和发展土动力学的有关理论和方法更是十分必要的手段(见土工原型观测)。

(俞培基)

tufang kaiwa

土方开挖 (earth excavation) 为工程建设将土(包括粘性土、砂土、砾、卵石及特大块石等)开采并从一处搬运至另一处的施工过程。水电工程的土方开挖包括弃土和取土。

(1)弃土是将建筑物多余土方开挖、运输、堆置在弃料场的施工过程。常用于场地平整、基础土方开挖、河道疏浚及地下工程中的土方掘进等工程。

(2)取土是在指定料场开采土料运至指定地点的施工过程。常用于混凝土骨料开采、土坝坝料开采、建筑物回填等工序。尽量利用弃土作好土方平衡,是水电建设中节约资金的主要措施之一。

土方开挖根据施工条件分为陆上、水下和特殊施工3种。

(1)陆上施工。水位以上的各类土方开挖。水电工程土方开挖量大,一般都采用机械作业,遇土方量不大的工程,有时用镐、锹等简单工具开挖。机械作业在土层较厚、土壤天然含水量较低时,常用正、反铲挖掘机、斗轮回转挖掘机等立面开挖,自卸汽车、带式输送机或



有轨机车运输；土层较薄、土壤天然含水量较高、施工场面宽大时，常用铲运机、推土机配装载机平面开挖，自卸汽车或有轨机车运输。陆上土方开挖常遇地下水位过高，施工中要降低水位，变水下土方为陆上土方施工。在高边坡开挖时，要根据不同土质保持边坡稳定或及时支护以策安全。

(2)水下施工。包括疏浚和特殊部位淤泥清除两种。疏浚，即浚深淤浅了的河、湖、水库、港湾等水域。特殊部位淤泥清除，如围堰过水后的基坑清淤，围堰堰体水下部分拆除等。常用的水下土方开挖机械，有索铲，正、反铲，抓斗，挖泥船等。索铲，正、反铲和抓斗可在岸边施工，也可固定在趸船上成铲扬式或抓扬式挖泥船施工，适用于水下硬质土壤开挖。挖泥船还有绞吸式、耙吸式和链斗式三种。绞吸式和耙吸式挖泥船常用排泥管配合输泥，适用于广阔水域疏浚。链斗式挖泥船配架空长槽输泥，适用于浅水低流速水下开采砂砾料。

(3)特殊施工。在工程特殊部位采用特殊手段的施工方法。主要有①用风水枪配泥浆泵清除淤泥。②用高压水枪将土造成泥浆利用地形高差自流输泥至需用部位的水力冲填。③隧洞的盾构法或顶管法（见隧洞开挖）。④在流沙地层开挖地下工程时的冻结法，即将周围土壤冰冻的开挖方法。⑤为改土造地采用的定向爆破法（见定向爆破）。

（王守道）

tugong hecheng cailiao

土工合成材料（geosynthetics）能对土体起隔离、排渗、反滤和加固等作用的各种高分子工程材料。可大致分为3大类：①透水有纺、无纺及编织型土工织物；②不透水的土工膜；③专门产品，包括土工格栅、土工网、土工席垫等。其原料大多是聚丙烯、聚乙烯、聚酯等。土工合成材料强度高，重量轻，有柔性，耐磨，抗腐蚀，吸湿性小，可在工厂预制，施工简便，在土木工程领域内得到广泛应用，它的出现被誉为土木工程中一次最为重要的革命。

性态测试 在工程应用中需视具体条件选用合适材料及型号，并进行合理设计，为此首先要对土工合成材料的性态进行必要的测试。主要内容有：①物理性（密度、厚度、单位面积质量、孔隙率等）。②力学性（抗拉、抓拉、撕裂、顶破、蠕变等强度）。③水力特性（垂直与水平渗透性、孔径、抗渗、比降等）。④合成材料与土相互作用的功能，如摩擦、拉拔及淤堵等。⑤高分子材料在环境因子作用下的老化等。

功能 土工合成材料用于土体主要有隔离、渗滤、排水、加筋、封闭、保护等功能。①隔离，将两层不同

的材料相互分开，阻止混杂，却允许排水。如将无纺布物铺在铁路道碴与地基土之间，能防止道碴下陷和积水时细粒土向上抽吸，避免路基翻浆冒泥。②渗滤，防止细粒土被水流带走，可用它代替砂砾料滤层。③排水，厚无纺布物本身平面内有导水性，铺在土内作为排水层。④加筋，埋在土体内的合成物靠它和周围土之间的摩阻力及（或）咬合力，可传递作用于土的剪应力，使应力和变形均化，提高土的承载力，例如可用于软土地基、土坡及挡土墙后填土的加筋。土工格栅对此尤为合适。⑤封闭，土工膜可用于隔水，铺在水池及渠道底部可以防渗。⑥保护，铺设在载荷集中和水流冲蚀的土面上，可起缓冲及分散作用。在沙岸、海岸边坡上铺设，上覆块石盖重，能防止岸坡冲刷。不同土工合成材料可发挥上述一种或几种功能，亦可制造组合型土工合成材料以满足特殊要求。

发展概况 土工合成材料是20世纪50年代末期开始在土木工程中使用的，60年代以来得到迅速推广，现在广泛应用于公路、铁道、水利水电、港工、石油、冶金等部门的地基、填土、挡土墙、隧道、尾矿坝、运动场及军事工程中。1977年以来已召开过三次土工织物国际会议，1983年成立了国际土工织物协会（International Geotextile Society, IGS），在国际土力学与基础工程学会（International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, ISSMFE）下也设立了土工织物技术委员会，表明土工界对土工合成材料的高度重视。中国起步较晚，从70年代末才开始研究试用，1984年成立了土工织物科技情报网，连续召开了两次全国性的学术会议，推动了中国土工合成材料的发展。随着产品制造、科研、应用的深入和开拓，土工合成材料的应用领域日益扩展。例如：目前已按工程意图生产多种特殊功能产品；采用预张土工织物，以减小土体位移；发展纤维土，在土中拌入聚酯连续细丝（33 g/km）或合成网片，使其随机分布而形成真正的复合土（大体均质）；制造生物分解的土工织物，保护植被生长；以轻型织物作防风屏，减缓气流及风速，助长流沙沉积，以防止沙漠化等。在设计方法方面，大多沿用传统土力学原理，如用极限平衡理论校核稳定性，以H. -P. -G. 达西（H. -P. -G. Darcy）定律为基础作渗透分析等。有限元分析也刚开始试用。对作为复合材料的力学特性和设计理论，尚待进一步研究完善。

（王正宏）

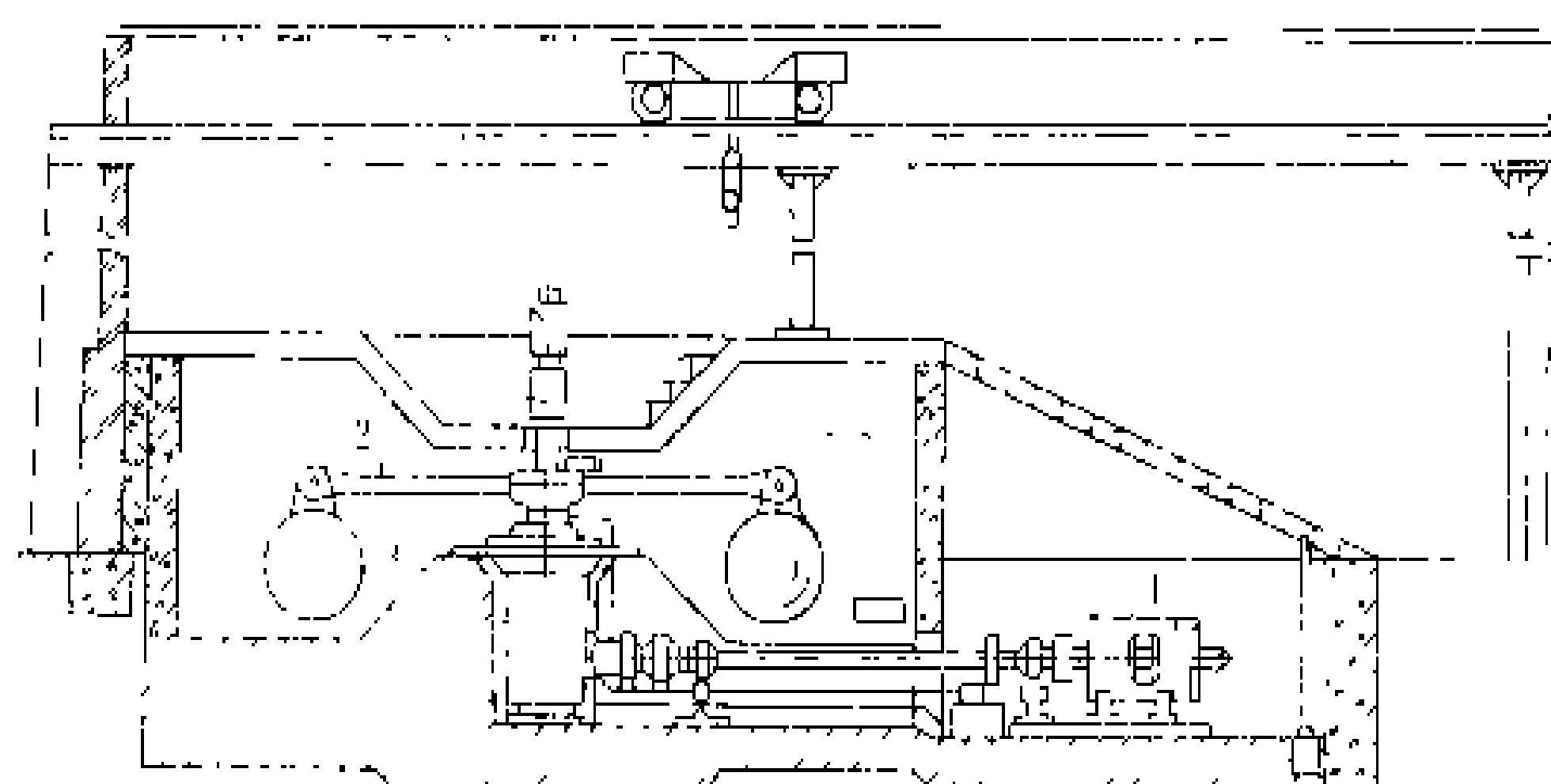
tugong maxing shiyan

土工模型试验（geotechnical model test）

用与土工建筑物和基础原型相似的模型进行试验，揭

示或预测原型的主要物理现象和性状的手段。常用于解决岩土工程实际问题和进行应用基础理论研究。试验模型必须满足相似法则(如几何相似、材料相似等),才能再现原型实际发生的现象。相似法则可通过量纲分析或微分方程、物理法则导出。为满足相似法则要求,土工模型一般用原型土料制备。土工模型试验分普通模型试验和土工离心模型试验两种。此外,渗水力模型、土石坝静力学模型的试验技术也在不断发展。

普通模型试验 将几何尺寸为原型的 $1/n$ 的模型,在重力场下进行试验。如挡土墙模型试验、浅基础承载力试验、桩和桩群在垂直和水平载荷作用下的模型试验、加筋土模型试验、渗流模拟试验等。这类模型试验由于简单易行,获得了广泛应用,为试验和发展理论计算方法提供了依据。但普通模型试验不满足模型相似法则的要求,有时不能反映原型的主要物理现象,当采用不同比尺模型时,试验结果会有很大差别。



土工离心试验机示意图

1—直流电机; 2—转臂; 3—吊篮; 4—液压滑环; 5—电滑环

土工离心模型试验 将几何尺寸为原型的 $1/n$ 的模型置于离心加速度为重力加速度 n 倍的离心力场中进行试验。它始于 20 世纪 30 年代,60 年代以后,苏、英、法、日、美、联邦德国、荷兰、丹麦等国先后建置大型土工离心机。中国于 70 年代末开始建置,并于 80 年代初开始进行这项试验。土工离心机示意如图。离心模型试验不仅满足模型相似律的绝大部分要求,而且模型的应力和应变均与原型相应点的应力和应变相等。离心模型和原型具有相同的应力-应变-强度关系,相应的应力水平、应力路线,相同的破坏机理、破坏型式。土工离心模型试验已广泛地应用于渗流、固结沉降、堤坝、挡土墙、锚定板、浅基础、土与结构物的相互作用、土与土工织物的联合作用、采矿钻井、地球物理、大地构造、爆炸效应、地震和振动等领域。土工离心模型试验的不足之处有:①土颗粒尺寸不能缩小为 $1/n$,产生比尺效应问题;②当土体中惯性作用和孔隙压力消散同时存在时,产生时间效应问题。

(濮家骥)

tugong quyang

土工取样 (soil sampling) 从土体中采取代表性土样供测定其物理力学性质的技术。能保持其原位结构和天然含水量的土样称原状土样,否则称扰动土样。两种土样都可通过实验室测试,确定物理力学性质指标和参数,提供工程设计和施工应用。所有原状或扰动土样取出后,都要立即、准确、可靠地贴上标签,并记录取样地点、地面标高、取样深度、地下水位及其他现场情况,绘制土层剖面图。取样范围、布孔、深度及土样数量等应视工程类别和等级而定。

原状土样 采取原状土样可用于测定具有天然结构和含水量的原状土的渗透、固结、抗剪强度、应力-应变关系等力学特性,还可根据需要测定抗拉强度、动力特性等。浅层原状土样用人工开挖试坑或竖井采取;深层原状土样需用取样器从钻孔中采取。用取样器取原状土样时,要先钻孔至略高于取样位置,清除孔底残土,然后根据土质情况用静压或击入法使取样器贯入土层内取样。取得土样后应立即密封,以防含水量变化。钻孔、取样以及在运输、储存及削制过程中均应尽量减少土样扰动,但因取样而引起的应力解除必不可免。

(1) 取样器。有敞口贯入式、双筒式、活塞式等多种形式,需根据土的性质、软硬程度和其他条件选用。取样器规格对所采取土样的质量有很大影响,故对其直径、内间距比、外间距比、面积比、端部刃口的形式和角度等技术参数都有一定要求。

(2) 原状粘性土样采取。一般土层用敞口贯入式取样器。对于软粘土,特别是地下水位以下的软粘土,宜用薄壁活塞取土器。对坚硬粘土可用双筒式取样器。钻孔可以用回转钻机钻进。

(3) 原状砂样采取。取原状砂样较困难,有以下几种方法:①泥浆钻孔中用固定活塞取样器采取。②冻结法。在钻孔套管中投入液氮或干冰等制冷剂,使管周土体冻结成坚硬土柱,然后用取样器采取,用冷冻车送到试验室。效果较好,但费用昂贵。③用触变性钻进液代替泥浆钻孔,使砂土骨架固定,而采取原状砂样。④气压法。曾用过但未获推广。

扰动土样 采取扰动土样是为了鉴别土的属类、划分土层及评价土体性状。浅层扰动土样可用人工开挖或挖土机采集。深层土样用土钻或标准贯入器采取。取样过程中观察到土类有改变时,就应采集供鉴别用的土样。应从每种主要土类中,采取足够数量的土样供实验室试验之用。试验项目有密度、颗粒分析、液塑限、缩限、相对密度等物理性试验和矿物化学分析。在堤、

坝、道路、机场跑道等填方工程中,还用扰动土样做击实试验,并制备一定尺寸、具有与填土相同的密度和含水状态的试样,测定渗透、固结和抗剪强度等力学特性。

(王正宏)

tugong shiyan

土工试验 (soil test) 见土力学。

tugong yuanying guance

土工原型观测 (in-situ instrumentation in soil engineering) 对工程的土体或土与建筑物结合部位进行目测和仪器检测,以掌握其运行实态的手段。由于土体状况差异较大,设计计算中的影响因素较多,布置原型观测不但起到控制施工、监测安全和反演参数的作用,而且可以提高设计、施工及管理的技术水平。对于大型土石坝、水电站、高层和重型建筑物,以及灾害性滑坡体等都应进行土工原型观测,监测工程安全。土工原型观测分外部检测和内部观测两类。外部检测包括目测土体或建筑物的外表现象和在其表面埋设标点,用测量方法观测垂直和水平位移。土体内部观测须埋设仪器设备进行静态及动态观测。一般以静态观测为主,有变形、渗压和应力观测。对水工建筑物尤其应注意渗透观测。以现代高技术为基础开发的多种实时监测系统,可以对观测设备进行自动化集中遥测、数据采集、传送、处理和分析,提高了监测水平。

变形观测 分垂直位移、水平位移和土体应变观测。地基的垂直位移可用电磁式沉降仪观测,土石坝多用横梁式或水管式沉降计。内部水平位移通常用测斜仪观测,对土石坝也可用引张线式水平位移计。采用三向位移计可同时观测土体内部三个方向的位移。土体内部位移的观测数值是相对值,需通过对地表基准点的测量和换算,才定出其绝对值。

渗压观测 主要为孔隙水压力观测。土体内孔隙水压力的变化受土体固结和渗流的影响,选用渗压计需考虑观测时的时间滞后现象。为此对渗透性大的土体可用直径50mm的测压管,对中等渗透性的土体用竖管式渗压计,对渗透性小的土体可选用电测式、水管式或气压式渗压计。

应力观测 一般用土压计。常用土压计有液(气)压平衡式、钢弦式、差动电阻式、电阻应变片式等。按埋设部位又有界面式和埋入式两种。土压检测时,由于土压计承压面有变形,使局部土体应力场发生变化而影响测验值,如何校正迄今仍未解决。

渗透观测 对水利水电工程应注意渗透观测,包括对坝下游渗透流量、透明度及水质变化、绕坝渗透、

导渗降压效能等观测项目。

参考书目

Dunncliff J. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. New York: Wiley, 1988

(曹健人)

tulixue

土力学 (soil mechanics) 研究土和土体的工程性质及其应用的学科。土是岩石风化后就地堆积或经过搬运后重新沉积的地壳表层的松散堆积物。它是由固体颗粒骨架和充填在骨架孔隙中的水和气组成的三相体系,具有碎散性和孔隙性的特点。具有一定规模、被作为整体研究的土层称为土体。土力学是土木工程学和工程地质学相结合的产物,它借助于物理化学、力学、工程学和地质学的基本原理,通过土工试验、理论分析、工程实录等途径,研究土的渗透、变形和强度特性及其变化规律,土体渗流、变形和稳定计算理论和方法,土与结构物的相互作用,以及土体加固处理技术,解决地基、土坡、土工建筑物、地下洞室、挡土结构等实际土工问题。

土的成因和物理化学性质 在土的基本性质方面,需研究其成因、物质成分、结构性以及物理性和工程分类。

(1) 成因。根据土的形成条件,可分为残积土、沉积土(包括坡积、洪积、冲积、冰积、风积等)和人工填土等。残积土是岩石风化后原地堆积而成,沉积土是在一定地质营力作用下经过搬运后在特定环境下重新堆积而成,各具有不同的成分、结构性和物理力学特性。

(2) 物质成分。分为固相、液相及气相3种。①固相,可分成有机质和无机质两大类。有机质又分为动植物残骸未完全分解的泥炭和完全分解的腐植质。无机质可分为原生矿物和次生矿物。原生矿物是物理风化的产物,仍保持母岩的矿物成分;而次生矿物还有化学风化作用生成的与母岩成分不同的新矿物,包括粘土矿物和可溶盐类。粘土矿物以蒙脱石、伊利石、高岭石3组为典型,是粘土粒组的主要成分。可溶盐类按溶解度分为难溶盐、中溶盐和易溶盐3类。②液相,为水或各种电解质的水溶液,与固相表面有相互作用,对土的工程性质有重大影响。在粗粒组中主要是由水气界面上表面张力而引起的毛管力作用;对粘粒还有物理化学作用。受粘粒表面电场影响而与土粒相互吸引的水称结合水,而不受土粒表面电场约束的水称自由水,其中受表面张力控制的称毛管水,受重力控制的称重力水。其存在形态及在孔隙中的流动规律是各不相同的。冰是固态水,在土中有特殊的作用规律。③气相,主要

是空气,也有一些水蒸气和有机物分解产物。从力学性质而言,可分为开敞型和封闭型两种,前者与外界大气连通,而后者以封闭气泡的形式存在,其压力一般高于大气压。

(3) 结构性。包括宏观结构和微观结构两类。前者包括不同性质土层的空间分布、非均质、各向异性等,从勘测试验中探明以后在分析计算中予以考虑。微观结构包括颗粒空间排列及粒间力的大小和性质两部分,无粘性土主要取决于颗粒排列,而粘性土则两者都有影响。近代认为粘土颗粒以大小不同的团粒形式存在,以团粒理论描述粘土结构,解析其各异的工程特性。

(4) 物理性及工程分类。见土的工程分类。

土工试验 利用各种仪器设备测定土的矿物化学成分及物理力学性质指标,供土的工程分类、设计计算及确定施工方案之用。

土工试验有试验室试验、原位测试(见土的原位测试)及模型试验(见土工模型试验)3大类。试验室试验有矿物化学、物理性及力学性试验。

(1) 矿化试验。包括矿物成分分析,交换性阳离子总量及其成分分析,化学全分析,土中水全分析,易溶盐、中溶盐、难溶盐、有机质含量,比表面积, pH 值测试等。

(2) 物理性试验。试验指标有含水量、密度(或容重)、比重、颗粒大小分布、液塑限、缩性限度、最大最小密度、湿化、膨胀等项。计算指标有干密度(或干容重)、孔隙率、孔隙比、饱和度、液性指数、相对密度、活动度等。除为获取上述各项指标的试验外还有击实试验,用以求出填土的最优含水量和最大干容重。

(3) 力学性试验。有渗透和渗透稳定、压缩、固结、剪切、无侧限压缩、抗拉、流变及动力特性等试验项目。

对于特殊土类,如红土、湿陷性黄土、膨胀土、分散性土、冻土、盐渍土、泥炭等,各有其特殊的工程性质,常需进行专门性土工试验,以满足实际工程需要。

土的力学性质 表述在土体自重或外力作用下土骨架的应力-应变-强度-时间关系及孔隙水、气变化特性的基本规律及其数学表达式。土的力学性质可归纳为渗透、强度及变形三大定律,彼此有相对的独立性,而又有相互联系。可以用有效应力原理将它们贯穿起来。动力作用下的强度和变形规律见土动力学。

(1) 渗透。表述孔隙流体在孔隙中流动的特性,以渗透流速 v 与水力比降 i 的线性比例关系表达, $v = ki$, 称达西(H. - P. - G. Darcy)定律,其比例常数 k 称为渗透系数。对于密实的肥粘土、堆石等粗粒料、以及细颗粒可能在孔隙中移动的土,可能出现 v 和 i 的非线性关系。(见渗流)

(2) 强度。土的破坏由最大剪应力 τ 控制,它与剪切面上的法向应力 σ 成正比。土的抗剪强度以莫尔破坏包线 $\tau = f(\sigma)$ 表达,在一定应力范围内可取为直线,以库仑定律 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$ 表示,式中 c , φ 为土的抗剪强度参数,分别称为粘聚力和内摩擦角。(见土的力学性质)

(3) 变形。土体在自重和外载荷作用下的应力-应变关系,有弹性、非线性弹性、塑性、弹塑性、粘弹性、粘弹塑性等模式。固结和压缩是土体变形的重要方面。载荷下饱和土中孔隙水排出、超孔隙水压力消散、有效应力增长、土体积随时间而变化的全过程称为固结,也称主固结或渗透固结。固结后期在有效应力基本不变情况下因骨架蠕变而产生的长期变形称次固结。土在载荷下的最终体积变化称压缩。(见土的力学性质)

土工计算 将土力学基本理论用于解决实际土工问题所进行的分析计算工作。需要解决的土工实际问题主要为渗流、变形和稳定3大类。

(1) 渗流计算。目的是求解渗流场的水力要素,如水头、水力比降、渗透流速、渗流量、渗透压力等,用于评价土体的渗透稳定性,为变形和稳定计算提供孔隙水压力值,提供渗透流量作为经济评价的依据,确定混凝土建筑物底面上的扬压力等。主要手段是数值计算及模拟试验。(见渗流)

(2) 变形计算。以往主要是沉降计算和固结计算,近年来还用有限元法作应力变形分析,得出土体内各点的应力水平、三向位移、土与结构物共同作用等结果。(见土的固结和沉降、土体应力应变分析)

(3) 稳定计算。常用极限平衡法求出一部分土体沿某一滑动而相对于另一部分土体发生滑移的最小安全系数,评价土坡或土基的稳定性、挡土结构上的土压力以及地基承载力。近来用有限元法求土体内各点的应力水平,画出超应力区范围,做稳定性评价。用可靠度分析评价稳定安全度的方法正在发展中。(见土体稳定性)

发展概况 土力学是一门古老的学科。人们对土的认识可追溯到史前时期。最古老的土坝约在公元前4000年建于约旦。在埃及、中国、印度等古代文明发源地,大约公元前3000年就开始修筑防洪堤。古罗马人为改进道路建筑质量,发明了类似混凝土的新材料。中国宋代就有了较完善的建筑法规,有对地基进行开挖夯实等措施。但是直到1700年以前,土力学知识还是纯经验性的。

在1717~1925年间,针对土的性质及某些土工问题出现了个别的理论,但没有发展为完整的学科,可以认为是古典土力学的奠基时期。从1776年C. - A. de 库伦(C. - A. de Coulomb)提出土的抗剪强度公式

和土压力理论,到1862年W. J. M. 朗肯(W. J. M. Rankine)土压力理论发表,原则上解决了土体极限平衡理论及土压力问题。1856年H. -P. -G. 达西(H. -P. -G. Darcy)用砂作了系统的渗透试验,提出了达西渗透定律。1896~1902年在印度进行的管涌和反滤试验中,提出了水力比降理论,以及由上游护坦、截水墙、下游反滤层组成的防渗系统。1910~1927年间,粘土研究中出现了阿太堡(Atterberg)稠度试验、直接剪切试验、瑞典圆弧滑动稳定分析法,进行了固结和抗剪强度的基础研究。特别是K. 太沙基(K. Terzaghi)发现了有效应力原理,将土的主要力学性质联系起来,使土力学形成一门独立的学科。

以K. 太沙基1925年发表《建立在土物理学基础上的土力学》一书为标志,土力学开始形成独立学科,并进入迅速发展的近代时期。1936年国际土力学及基础工程协会(International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ISSMFE)成立,第1届国际土力学及基础工程会议在美国召开,现已召开了12届,促进了土力学及基础工程的国际学术交流。中国1939年开始在原中央大学开设土力学及土工试验课程,1940年在原中央水工实验所建立土工试验室。1949年以来,随着大规模经济建设的开展,土力学、土工试验及地基基础工程得到新的发展。20世纪50年代以后,由于电子计算机、电子技术及相邻学科的发展,使土力学的近代化进程显著加速:①土工试验仪器、方法和量测技术更加完善和现代化,能更好模拟土体的实际工作状态,获得较为符合土体实际状况的数学模型及参数。②以有限元法为代表的近代计算技术引入土力学计算,为解决复杂的土工问题提供有效手段。③原型监测技术大为提高,并引起普遍重视,作为安全评价、检验和改进设计施工的重要途径。④土工合成材料在加固土体中广泛采用,对土工技术有重要影响,加筋土等复合材料成为土力学研究的重要方向之一。⑤发展了土质学、土动力学、冻土力学、概率土力学、环境土力学、海洋土力学、冰雪力学、月球土力学等新分支。

参考书目

Proceedings of 11 th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Golden Jubilee Volume. A. A. Balkema Publishers, 1985

黄文熙主编,土的工程性质,北京:水利电力出版社,1983

(蒋国澄)

tushiba

土石坝 (embankment dam) 用土石材料

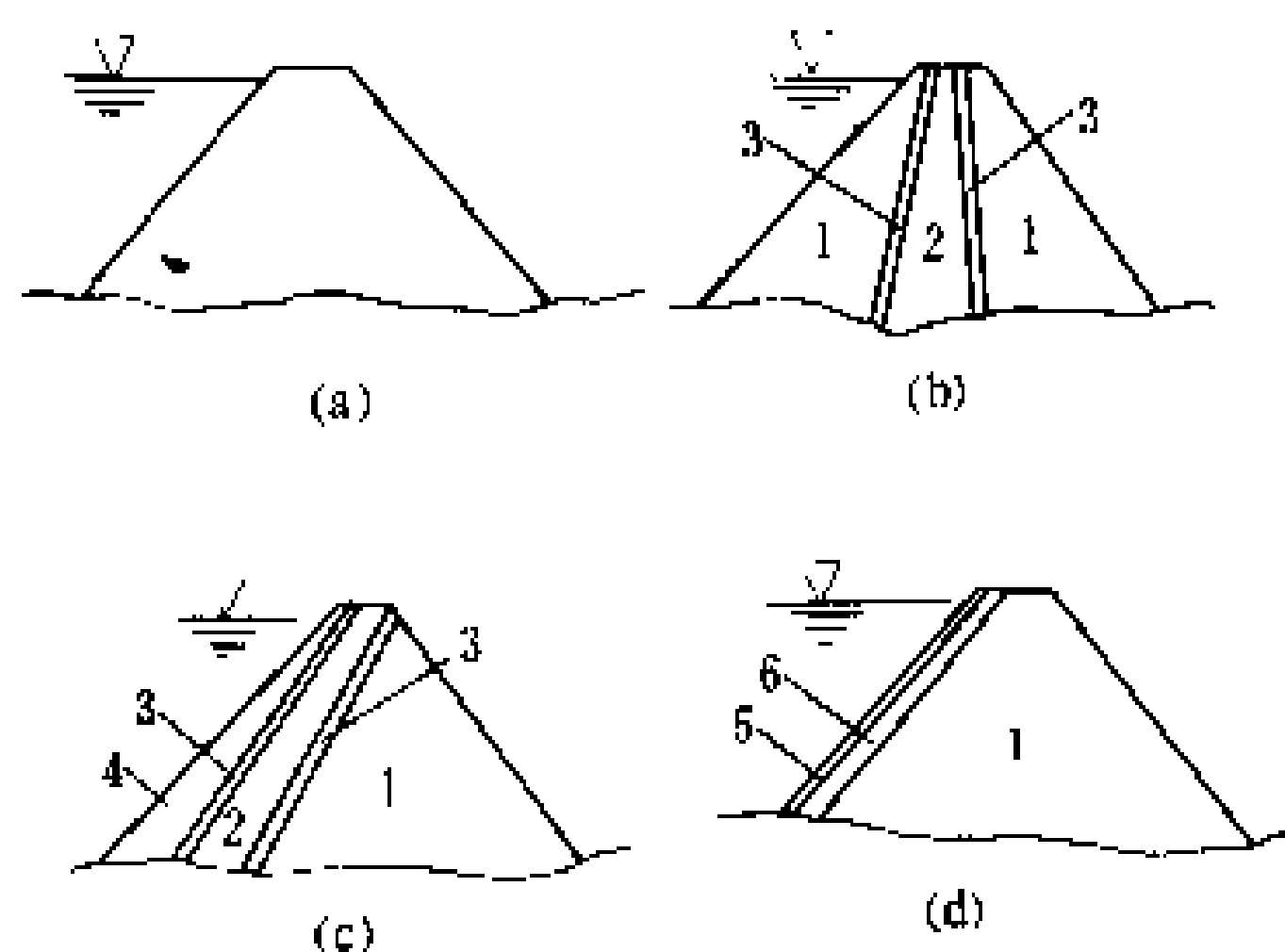
为主建造的坝。一般由支持坝体稳定的坝主体、防渗体以及反滤、排水、过渡层、护坡等部分组成。筑坝材料有粘性土、砾质土、砂、砂砾石、堆石、块石和碎石等天然材料,以及混凝土、沥青混凝土、土工合成材料等人工制备的料物。土石坝可以就地取材,充分利用开挖碴料,节约水泥钢材,减少外来材料的运输,能适应地质地形条件较差的坝址,具有造价低、工期短、便于分期建设等优点,在坝工方面得到日益广泛的应用。但土石坝是由散粒材料组成,只能挡水,不能过水,仅小型或临时工程可做成过水土石坝形式,所以峡谷地区大江大河上修建土石坝,要妥善解决好导流泄洪问题。

类型

(1) 按建筑材料分为土坝、堆石坝和土石混合坝。

①土坝。粘性土、砂砾石、砾质土等土质材料占坝体积的50%以上。②堆石坝。料场开采或建筑物地区开挖石料占坝体积的50%以上。③土石混合坝。从材料上难以明确划分的土石坝。

(2) 按防渗体类型分为土质防渗材料坝和非土质防渗材料坝,前者又可分为均质坝和分区坝。①均质坝。坝主体由渗透性相近的粘性土(包括砾质土、风化料)组成。②分区坝。由维持稳定的粗粒料坝壳和起防渗作用的土质防渗体共同组成,按防渗体位置分为土质斜墙坝和土质心墙坝,以及在坝中心而略倾向上游的土质斜心墙坝。③非土质防渗材料坝,坝主体由强度高的粗粒料组成,而防渗体则为钢筋混凝土、沥青混凝土、钢板、木板等人工制备的材料建成的上游面板。这种坝统称面板坝。有时也用沥青混凝土、混凝土做防渗心墙。中小型工程也在试用土工膜防渗层。其中以混凝土面板堆石坝应用最广。均质坝、心墙坝、斜墙坝和面板坝是土石坝的四种基本类型(见图)。



土石坝基本类型图

(a) 均质坝; (b) 心墙坝; (c) 斜墙坝; (d) 面板坝

1-坝主体(或坝壳); 2-心墙或斜墙; 3-反滤过渡层;

4-保护层; 5-面板; 6-垫层及过渡层

(3) 按施工方法分,主体有碾压、水中填土、水力冲填等型式。堆石体有碾压、抛填、定向爆破等型式。

碾压式土石坝是分层铺填土石料、分层压实填筑的,坝体质量良好,目前最为常用。世界上现有高土石坝都是碾压式的。

坝体断面 有以下特点。

(1) 材料分区由上游至下游,或由防渗体向两侧由细变粗,防渗体下游上部干燥区料物可适当降低要求。

(2) 防渗体与坝主体之间,各种不同料物之间都需满足反滤原则,否则需设置反滤过渡层。

(3) 防渗体下游、坝基表面及下游坝趾处设完整的排水系统,将渗过坝基及防渗体的水有控制地排至下游,以降低坝体浸润线,并防止渗流破坏。

(4) 上游面设置护坡,防止风浪淘刷及冰层和漂浮物的损害。下游坡可视具体情况设或不设护坡。坡面要设排除雨水的设施。

(5) 坝顶宽度视其用途和构造要求而定,最好设置柔性盖面。上游设防浪墙,与坝体防渗体紧密连接,并按挡水设计。坝顶要有足够超高,任何情况下不得漫顶。

(6) 坝的防渗体与坝基及其他建筑物必须紧密连接,不得有危害性渗漏现象,并与坝基防渗设施连接成完整的防渗系统。

坝基 分表面清理和坝基处理两部分。

(1) 表面清理。要求清除坝基表面的耕土层、植物根须、风化层、淤泥、松砂等软弱松散土层等,并对基岩表面断层破碎带、较大节理裂隙逐条清理回填,并喷砂浆或混凝土、浇筑混凝土盖板保护清理好的坝基面。

(2) 软基处理。见软基处理。

(3) 岩基处理。土石坝岩基在强度和变形方面能满足要求,主要是渗流控制,特别是与土质防渗体接触面上的渗流冲刷危害很大。常用的措施是在接触面上喷砂浆或铺混凝土垫层,并在防渗体底部基岩表层进行铺盖式灌浆和灌浆帷幕。(见灌浆)

分析计算 主要有稳定、变形、渗流及渗流稳定三方面。

(1) 稳定分析。有刚体极限平衡及土体内逐点应力水平分析两种方法。前者是假定一任意的可能滑动面,分别计算作用于该面上的抗滑力和滑动力,两者的比值即安全系数,经试算或解析求出其最小值,作为安全评价准则。计算时一般采用条分法,有考虑和不考虑条块间作用力的两类(见土体稳定)。后者是用有限元法求出各点的应力水平,将大于1的超应力区勾划出来,作为安全评价依据。工程实用上仍以前者为主,后者在试用和积累经验阶段。控制土石坝稳定的时期有竣工期、稳定渗流期及水库水位降落期,需分别核算,

并同时满足要求。地震区还要作动力稳定性分析。

(2) 变形分析。常用的方法有:①以弹性理论为基础的分层综合法,计算坝体及地基的垂直位移,即沉降量。②以固结理论为基础,计算沉降及孔隙压力消散的时间过程。③有限元法,计算各个时期坝体及地基各点的三个方向的位移、总应力及孔隙压力,用以判断可能出现的拉应力区和超应力区、可能出现裂缝的部位以及水力劈裂的可能性。

(3) 渗流及渗透稳定分析。传统的渗流分析方法是以水力学或流体力学理论为基础,对各种简化的典型断面求解析解。对复杂情况用电模拟法做试验求解。现代用电子计算机以有限元、边界元等方法进行数值计算有很大进展,已可用于复杂和大型课题的分析计算工作。根据绘制的流网图及土的渗流稳定特性,可以计算土体发生渗透破坏的可能性,并采取相应措施。(见渗流、渗流控制)

原型观测 分肉眼巡检及仪器观测两大类,后者又分为外部观测和内部观测。外部观测是在坝顶和坝坡表面设置标点,用测量方法量测其水平和垂直位移,或用测缝计量测坝面裂缝开展情况。内部观测是在坝体及坝基内埋设仪器,量测土体内部相应测点的变形(包括位移及应变)、总应力和孔隙压力(或测压管水位)。在坝下游适当部位,应设收集渗水的设施,观测其渗流量、水质及浑浊度。地震区应设地震监测仪器。现代还发展了自动化的实时监测系统,自动采集、传输、处理各种数据。(见土体原型观测)

发展简史 土石坝是一种最古老的坝型,可追溯到5000年以前。在中东地区、埃及、希腊、中国等文明发源地,早就修建土石堤坝,以形成蓄水或防洪工程。中国有记载的最古老的土坝是建于公元前约600年的芍陂,即今安丰塘水库,位于安徽省寿县的淮河支流上,利用丘陵起伏的地形,在低处筑土坝,围成陂塘,经历代整修,沿用迄今。公元514年,中国在淮河中游干流上修建过50m高的浮山堰大土坝,表明当时筑坝技术已有相当水平。

在20世纪40年代以前的早期阶段,土石坝的设计基本上是经验性的。由于施工机具的限制,大型碾压式土石坝还很少,但是水力冲填筑坝方法却大为流行,陆续修建了不少高50m以上的大体积土坝。堆石坝的发展比土坝要晚得多,直到20世纪30年代以后才有较大发展。当时堆石坝是用厚层抛填方法填筑的,初期用木面板防渗,以后又用钢、混凝土及沥青混凝土面板。那时还没有土质心墙的高土石坝。在20世纪40~50年代,由于抛填的混凝土面板堆石坝都有大量变形导致的裂缝漏水等问题,使这类高坝几乎停建。土力学理论的发展提高了土石坝设计水平,特别是反滤层原



理、压实理论等重大发现,使土石坝安全性更有保证。同时施工机具的发展,已有可能在短期内完成大量土石方工程。这就导致土质心墙坝的迅速发展,建成了一批高 150 m 级的心墙坝,运行情况都很好。

60 年代以后,土石坝建设进入现代阶段。由于采用振动碾薄层碾压堆石取代了厚层抛填堆石,坝体密实而且变形很小,不致引起混凝土面板断裂和接缝张开的大量漏水,使混凝土面板堆石坝重新得到发展,并达到 160 m 的高度。土质心墙坝坝高已达到 300 m 以上。世界上已建成和在建的坝高 150 m 以上的坝,至 1986 年底达到 118 座,其中土石坝 51 座,占 43.2%,且其比重日益增加。两座 300 m 以上的高坝,即苏联的罗贡(Рогун)和努列克(Нурек),也都是土石坝型。近年来,混凝土面板堆石坝以其适应性、安全性和经济性好的特点,得到越来越广泛的应用。

(蒋国澄)

tushiba cailiao xianchang shiyan

土石坝材料现场试验 (in-situs material test for earth and rockfill dam)

指料场开采试验,筑坝材料有关特性调整试验,现场土石料铺筑压实试验等。通过现场试验核实或修正有关筑坝材料的设计、施工技术指标,选择合适的施工机具和施工工艺,确定各项施工参数和施工质量要求。

料场开采试验 料场的材料是否值得开采,要经过技术经济论证,在论证中除料场地形、地质、水文、气象、储量及质量等客观条件外,施工设备和施工工艺选择主要取决于现场试验。①土料。根据料场大小、料层厚薄、可开采量和土料的天然含水量,在料场进行不同施工设备和施工工艺的开采试验,确定平面开采的分层取土厚度或立面开采工作面高度。砂砾料,除在料场选择施工设备、开采及筛选工艺外,包括将水下开采转变成水上开采和动水开采转变成静水开采的施工工艺试验,减少细粒料流失量和天然级配的筛分试验。②石料。在有代表性料场采用不同爆破方式的爆破试验,包括:爆破参数选择及爆破器材性能试验,起爆网络准爆试验,药包或炮孔结构设计参数选择试验,为满足开挖强度要求的梯段高度、台阶宽度、爆堆形状、爆出岩块级配和石块粒径等爆破效果试验,不同爆破方式所产生爆震波、空气冲击波及个别飞石对附近建筑物和施工活动场所的影响范围测定试验等。

筑坝材料有关特性调整试验 筑坝材料由于受料场地形、地质、水文、气象等影响,各项指标很难同时满足设计和施工要求,常需经过现场施工试验加以调整。①土料。用作防渗体的土料,当天然含水量高于或低于施工含水量(见土石坝施工)上下限值时,都要在

料场通过施工试验调整。若天然含水量低于施工含水量的下限值,一般要在料场筑小围堤成畦块灌水,进行料场浸水试验,开始时浸湿深度较浅,表土的含水量高,随着浸水时间延长浸湿深度增加,表土的含水量下降,经过一定时段后土的含水量接近稳定,且多在塑限附近时,可以符合施工要求。若天然含水量高于施工含水量上限值,通常在料场用农耕机械将表土层开沟、耕松、捣碎、翻晒等施工工艺降低含水量,使水分自然蒸发达到合格土料,有条件时,也可将高含水量土料通过热风进行强制干燥,使达到合格土料。当料场土的粘粒含量较高,或在年降雨量较大的潮湿多雨地区施工困难时,可进行人工掺合料试验,在料场将粘土料与干燥粗粒料按试验级配交替分层平铺,然后用挖掘机械立面或斜面开采拌和,掺合均匀,达到设计和施工要求指标。②砂砾料,天然砂砾料要经过筛分,若超径过多或级配中断缺少某一粒径范围料时,常通过试验找出调整措施,加工超径料或石渣补充所缺粒径。③石料。开采的岩块较大时,在料场进行解炮试验(即将大块石再打眼放炮使其改小);利用建筑物开挖的石渣时,作清除石粉、泥团、杂物和调整级配试验等。

土石料铺筑压实试验 坝体填筑前,一般都要进行不同压实设备和施工工艺试验,选择各项施工参数和压实机具。①土石料参数试验,选有代表性的土石料进行土的击实、剪力、揉搓、振动、压实试验,砂砾料的渗透试验,石料的强度试验等,以核实设计采用的坝料参数是否合理。②施工工艺试验,对各种坝料所选用压实机具的碾重、接触压力、铺料方法、铺料厚度、压实方法、碾压或夯击遍数、含水量控制等施工参数进行对比试验,作为施工单位编制施工措施计划的依据。碾压试验前,根据理论计算、室内试验成果或参照其他工程经验,初步选定几种碾压设备和拟定若干个碾压参数,采用逐渐收敛法反复试验,使所有参与碾压试验的参数都达到最优,然后进行复核,若能满足设计和施工要求,即为所定的压实参数。由于在试验时不可能与现场施工条件完全一致,所得试验的压实标准合格率应稍高于设计要求。

质量控制试验 在坝体填筑施工中,按规定随机取样控制坝体压实质量的试验,是保证压实体填筑质量的必要手段。①土料。通常在施工中控制土料的含水量和各种坝料的干容重指标。在料场快速判别土料是否适合上坝,一般根据经验用手试法估测含水量。坝体土料压实干容重是否合格,除用手试法估测外,主要随机取样烘干测定,据以及时校正压实的干容重。一般土的含水量测定有酒精燃烧法、红外线烘干法、电炉烘干法、微波含水量测定仪等。②坝体容重测定,粘性土及砂用体积为 200~500 cm³ 环刀取样测定;砾质土、砂



砾料、反滤料用灌水法或灌砂法测定；堆石体因其空隙大，一般用灌水法测定。

(王守道)

tushiba shigong

土石坝施工 (earth and rockfill dam construction) 用土石材料筑坝的实施过程。土石

坝根据施工方法,可以分为碾压式土石坝、水坠坝和定向爆破坝等。由于各类土石坝的规模不一,坝址处施工条件各异,当地料源互有差别,施工导流和施工期渡汛要求不同,同一类型的土石坝,其施工方法也各有差异。

土石坝施工方法以碾压填筑最为普遍。土石坝施工包括:导流、料场规划、坝料开采、料物运输、坝体填筑、坝基防渗、施工质量控制等工作。

导流 土石坝体大都在干地填筑,在没有保护设施时,不允许坝体过水,所以施工时要将河水导向一侧或坝址以外泄流(见施工导流)。土石坝施工常用土石围堰挡水,为节省坝体土石方量,也常将围堰与坝体结合作为坝体的一部分,则堰体施工时的各项技术要求与坝体同。

坝体施工期的拦洪渡汛,是土石坝施工的关键。因为土石坝体属非凝集性材料组成,不能承受水流冲刷,即使坝面增加保护措施,随着坝体上升,上下游水头差加大,所增加保护措施的工程量亦将十分艰巨。因此,通常在土石坝施工中用抢筑坝高来拦洪渡汛。当坝体全断面渡汛有困难时,常用施工临时断面拦挡洪水,以降低坝体填筑强度,但临时断面要能满足安全超高、稳定、防渗及顶部预留适当宽度以适应在遭遇非常洪水时抢筑子堰的要求。

料场规划 土石坝施工前要进一步查明各种筑坝材料的可开采储量,避免在施工中停工待料。各料场的开采程序,要按规划分别确定其开采范围、使用时段和填筑部位,提出分期分批用料计划。做到高料高用,低料低用,上下游料避免交叉运输,并保留一定备用料场和有计划地划定一部分近料场供坝体合龙(见截流)和抢筑拦洪高程时使用。

利用建筑物施工中的渣料作坝壳填筑料,是土石坝施工中降低工程造价和减少重复开挖的有力措施,一般在料场规划中均很重视。

料场规划确定后,要划定料场用地范围,包括弃料堆存和坝料加工、中转储存场地,并作出竣工后恢复料区地貌的远景规划。

坝料开采 所有土石料只要符合设计要求都能用于筑坝,只是坝体设计断面大小,开采、加工技术复杂程度和材料单价高低有差别。坝料包括土料、砂砾料、

石料的开采。

(1) 土料开采(见土石料开采)。当料场土层较薄或土的天然含水量大于施工含水量上限时,一般采用平面开采法;土层较厚,沿深度的土的含水量不匀或表层土的天然含水量小于施工含水量下限时,则采用立面开采法。施工含水量为最优含水量以上3%、以下1%范围的含水量。

(2) 砂砾料开采(见土石料开采)。砂砾料作坝壳料时,要注意控制特大卵石,使不影响填筑层厚度。以砂砾料作为土石坝的反滤料时,因要求质量高,一般须筛选加工配制。当坝址附近缺乏天然反滤料时,也可用石料破碎加工获得。

(3) 石料开采(见石方开挖)。常用深孔梯段爆破或洞室爆破法开采。对要求规格严而数量不大的石料用浅孔爆破法开采。

料物运输(见运输机械) 将开采好的合格坝料从料场运至坝面的过程,有无轨运输、有轨运输、连续运输和水力运输四种方式。

(1) 无轨运输。是土石坝施工中最常用的运输方式。除近距离土料用铲运机自身完成采、装、运、卸各个工序外,目前多用自卸汽车作运输工具,其优点是效率高、机动灵活、能直接将各种坝料卸至坝面指定位置,适于运距长、运量大的各种料物。

(2) 有轨运输。用铁路机车运输坝料。分标准轨和窄轨两种轨距。中国的标准轨距为1435 mm,窄轨轨距有600、762、1000 mm等。有轨运输的运量大,运费低,但铁路建设投资大,技术要求高,对地形的适应性差,而且料物难以直接上坝。

(3) 连续运输。用带式输送机运送坝料。其优点是设备简单,操作方便,运输强度高,运费最低,但机动性能差,一条输送带同时只能运送一种坝料,且一旦中途发生故障将迫使全线停工。

(4) 水力运输。集高压水枪开采土料和自流运输于一个工序的土料特殊运输方式,只适用于粘粒含量少,工程量小,运距短且有居高临下有利地形的中、小型水坠坝。

坝体填筑 一般坝体填筑按设计坝型及设备能力将坝面划分成若干区段流水作业。运到工作面的合格坝料,经过卸料、平整、洒水、压实、刨毛和抽样检验合格后方能完成一个填筑块。在坝体填筑前,要先将坝基表层植被、杂物等有机质清除,对坝基内不良地质构造进行处理,作好基础防渗设施(如浅覆盖层的截水槽)或其准备工作(如深覆盖层的灌浆廊道)。坝体填筑分为碾压式土坝填筑、堆石坝填筑、水坠坝填筑、定向爆破坝填筑、反滤料填筑等。

(1) 碾压式土坝填筑。包括均质坝、土质心墙坝

或土质斜墙坝的防渗土体的填筑。土质心墙坝和土质斜墙坝的填筑程序不同。前者在同一高程工作面,先填筑心墙土料,而后按设计结构填筑两侧反滤料和上下游过渡料或坝壳料;后者则先填筑下游坝壳料,而后下游过渡料及反滤料,再填斜墙的土料和上游反滤料,最后是上游过渡料或坝壳料。早期碾压式土坝常用牵引式羊足碾或汽胎碾压实,20世纪70年代发展为自行式羊足碾、凸块碾或振动凸块碾,压实效率高,压实质量好。在缺乏碾压设备的工地,也有用夯板夯实土料,其优点是铺土层厚,需要工作面小。在坝面边角及两种坝料的接合部位,大型碾压设备不能压到之处,还要用轻型夯击实。

(2)堆石坝填筑。早期堆石坝体用高架抛填,依靠石料自身冲击力量密实,要求石料新鲜坚实,抛填时还要用压力水冲射,用这种施工方法填筑的堆石体沉陷量大。振动碾压设备出现后,堆石坝体可以如土坝施工一样分层用振动碾压实,对石料要求也适当放宽,且可最大限度地利用坝址处建筑物开挖渣料或河床卵砾石料。

(3)水坠坝填筑。水坠坝又称泥浆自流式冲填坝,是20世纪70年代中国群众在治山治水中创造并发展的中、小型土坝。施工方法视坝高、土料特性、冲填方式而定。一般脱水条件较好的土料,多用一畦冲填;对中、粉质壤土,则可划分若干畦块。冲填前先在畦块周围筑埂,坝体上下游边埂用碾压法填筑,起临时分畦作用的中埂用虚土堆筑,畦块内设有砂井、砂沟等临时排水设施。冲填时借水枪水力将筑坝土料冲拌成一定浓度的泥浆后,经输泥渠自流到坝面,经脱水固结成坝体。冲填一次后的坝面积水用虹吸、移动机泵或埋管引至坝脚外,局部积水用干土处理。

(4)定向爆破坝填筑(见定向爆破)借炸药能量将被爆介质沿着预定方向抛掷堆积成一定形状的土石坝体。爆破前,在坝址一岸或两岸根据地形地质条件和要求上坝方量,预先设置起爆药室。药室数量、大小、位置以及抛掷方向、起爆时间根据装药量和要求爆落石方堆积部位设计,用导洞、竖井或斜井与地面沟通。药室装药后用起爆体即用木或其他材料制成内填炸药和起爆雷管的先期起爆箱起爆。爆破后剩留在爆区的岩块用堆石坝填筑方法施工。

(5)反滤料填筑 在坝体填筑中,反滤料与防渗土料及过渡料(或坝壳料)平起成犬牙交错,但要保证反滤层的有效厚度符合设计要求。为了减少反滤料的加工量,近来一些高土石坝趋向使用层次少、厚度大、级配范围宽的天然砂砾料,最多加工一次,筛出较大粒径即可使用,其铺筑压实与其他坝料一样。20世纪70年代初,随着高分子化学工业的发展,出现了土工织物,

一种可代替传统的砂砾料反滤层或土料防渗层的合成纤维产品,具有施工简便、工期短、造价低等优点。

坝基防渗 土石坝基为砂砾石覆盖层时的坝基防渗,通常采用截水槽、混凝土防渗墙和灌浆帷幕等垂直防渗措施。

(1)截水槽。在河床覆盖层明挖成槽后,回填粘土或混凝土与坝体防渗体直接连接。在低土石坝无漂卵石的砂土基础,也有用打钢板桩或借助射水法沉入钢筋混凝土板桩防渗,板桩锁棒间灌水泥浆封堵。

(2)混凝土防渗墙。是砂砾石河床常用的坝基防渗措施。有连锁桩柱式、槽板式、板桩灌浆式和宽槽式四种。①连锁桩柱式防渗墙。用冲击钻造圆孔,套管或泥浆固壁,用导管法在泥浆下浇筑混凝土或粘土混凝土。各桩柱孔连接方式有互相搭接型和先主孔后劈削孔连接两种。②槽板式防渗墙。用冲击钻、反循环钻或抓斗等机具造槽孔,泥浆或清水固壁,用导管法在槽孔泥浆或水下浇筑混凝土、粘土混凝土或固化灰浆又称自凝灰浆,即在槽孔泥浆中添加水泥等固化材料、粉煤灰等掺和料及各种外加剂,经充分搅拌凝结而成的混凝土防渗墙。③板桩灌浆式防渗墙又称板桩灌注防渗墙。将加厚的钢板桩打入坝基后用液压拔桩器将钢板桩缓慢拔起,同时通过焊接在桩体上的灌浆管灌注水泥砂浆或水泥膨润土浆填充桩体余出的空间,一般厚度仅10~30cm,故又称薄防渗墙。④宽槽式泥浆防渗墙又称泥浆槽。用索铲、抓斗、反铲等机具挖槽,挖出的渣料再按设计配比补充不足粒径骨料和膨润土后,用推土机拌匀回填入槽成墙。

(3)灌浆帷幕。在深厚砂砾覆盖层软基采用灌浆帷幕的施工方法有:①套管法。用吊锤或振动沉管法把钢管打入无孤石层的基础后,冲洗管内泥砂,自下而上分段自流或压力灌浆。②循环钻灌(边钻边灌)法。孔口封闭,自上而下分段钻孔分段灌浆。③预埋花管法。钻孔内下入灌浆花管,分段栓塞灌浆。④高压旋喷法。用带有特殊喷嘴的高压脉冲泵,借强大水气射流切割周围土体,搅拌浆液及其添加的水泥、粉煤灰等掺合料,经“旋、定、摆”喷浆充填,凝结成新的防渗墙体。

施工质量控制 一般土石坝工地均按坝型要求设有土工、混凝土、沥青试验室,控制自料场至坝面的施工质量全过程。

坝体填筑前,根据设计要求指标,各个料场的不同料源,施工工艺和设备性能,在现场坝体以外作各种坝料的压实试验,选定所用设备的各项参数和质量控制指标。在施工中,按规定随机取样检测压实后的干容重(砂砾料、堆石体进行相对密度校核),中国SDJ213-83《碾压式土石坝施工技术规范》规定的坝体压实干容重合格率应在90%以上,防渗土体还要在定断面取原

状样作物理力学分析。

对沥青混凝上面板的施工质量控制要求、沥青的针入度、软化点和延度,沥青混合料的配比、沥青用量、矿料级配等项指标均达到正负公差限制。在沥青混凝土面板铺筑中,随机取样检验容重、孔隙率、渗透系数和力学性能。面板取样后的孔穴,要及时回填。也可采用非破损性快速测定法,如用渗气仪测渗透系数,用同位素密度测定仪或核子密度仪测容重等。

发展简史 土石筑坝历史悠久。中国于公元前613~前591年,已在安徽省寿县淮河支流修建芍陂土坝(即今安丰塘水库)用于灌溉,经历代维修使用迄今。过去土石坝均用人工修建。随着科学技术的发展,土石坝施工方法不断创新,20世纪60年代后,由于重型机械和振动碾压设备的出现,使土石坝在世界大坝建设中的比重逐年增加。在70年代,面板堆石坝受到重视后,又为缺乏防渗料源的峡谷地区修建高土石坝开创了新的途径。现代土石坝施工,趋向使用大容量、高效率的配套机械,上坝强度大,压实密度高,工程质量得以保证而造价反而降低。至20世纪90年代初,苏联修建的努列克(Нурек)和罗贡(Рогун)土石坝,坝高分别已达300 m和325 m。

(王守道)

tushiba yuanying guance

土石坝原型观测 (prototype observation for earth-rockfill dam) 对土石坝及其环境进行仪器量测及巡视检查,以了解和评价其运行实态的技术。它可以监测土石坝有无裂缝、滑坡、渗漏、管涌、坍塌、冲蚀等危害安全的现象,评价其运行是否安全和正常,并为改进设计、施工和运行管理积累资料。施工期原型观测资料还可作为控制施工和必要时修改设计的依据。观测项目、要求、仪器数量和埋设位置根据土石坝的结构型式、坝高、地形、地质等条件决定。对于重要的和较高的土石坝,基本观测项目分变形、应力和渗流三大类。还可根据工程的重要程度和自然条件,增加一些专门性的观测项目,如坝体内部的水平位移和土体应变、地震加速度、绕坝渗流、岸坡稳定等。为配合资料分析的需要,还应观测水库上下游水位、水库淤积等项目。

变形观测 可分为外部观测和内部观测。外部变形观测系在土石坝表面埋设标点,以坝外的基准点为依据,用精密测量方法测定标点的垂直和水平位移。内部垂直位移(即沉降)观测可用横梁式沉降管、电磁式沉降仪、水管式沉降仪等方法。内部水平位移观测可用测斜仪、引张线式水平位移计等方法。此外还可用上体应变计观测土体应变及可能发生的裂缝。

应力观测 可分为总应力和孔隙水压力观测两种。土体总应力亦称土压力,用土压力计进行量测。土压力计有两种,一是量测土石坝作用在相邻刚性建筑物界面上的土压力用的界面式土压计,另一是量测土石坝内部土体总应力的埋入式土压计。将土压计测头上的感应薄膜换成透水石,即可用于量测该点的孔隙水压力。由土压力及孔隙水压力观测成果可换算出相应点的有效应力值。量测设备有电阻应变式、差动电阻式、钢弦式、气压或液压平衡式等多种型式。应力观测的影响因素复杂,较难得出精确成果。

渗流观测 包括渗透压力、浸润线、坝基及绕坝渗流、渗透流量、渗透水质及浑浊度等项目。渗透压力观测是用渗压计量测土石坝体内相应点的孔隙水压力及坝基各点的测压水位,以绘制流网图,并得出各项渗流要素。渗压计一般分为竖管式、水管式、气压式、电阻式、钢弦式、差动电阻式等。竖管式测压计又称测压管,是最简单和常用的一种,下部为透水管段,上部连竖管引至地面,测量管中水位,适用于中等以上透水性的土层。其他型式测压计中以钢弦式最为常用。土石坝下游渗流量及渗透水质和浑浊度观测对安全监测十分重要,可直观地检验土石坝的安全运行状况,一般要加适当的工程措施,将渗透水流分区集中和导出,用量水堰测定其渗透流量。

仪器设备选择及埋设 观测设备的选用原则是有效、可靠和坚固。各种型式的仪器各有其优缺点,应根据土质和工程要求选用。观测仪器埋设必须符合技术要求,不然将得不到准确结果,甚至导致错误的结论。对土石坝,初次蓄水期的观测要特别注意。观测资料要及时整理分析,作出评价和预报。近年来,自动化和遥测遥感技术已逐步应用于土石坝原型观测。

(曹健人)

tushifang kaiwa jixie

土石方开挖机械 (earth and rock excavation machinery) 在土石方工程施工中用以进行挖、装、铲、推等作业的机械设备。此类设备有单斗挖掘机、多斗挖掘机、装载机、隧洞挖掘机、装岩机、挖泥船等。推土机、铲运机等虽不能直接挖装,但可切土、推运(或铲运),也属于开挖机械。

单斗挖掘机 用一个刚性或挠性连接的铲斗,以间歇重复的循环动作进行挖掘或装载作业,是一种周期作业自行式土石方机械。它具有挖掘能力强,构造通用性好,能适应不同作业要求的特点。单斗挖掘机按动力装置划分有内燃机驱动与电动机驱动二种。按传动方式划分有机械传动、液压传动和混合传动三种。按行走装置划分有履带式、轮胎式、步行式、浮动式和铁路



式等。土石方开挖常用的单斗挖掘机有正铲挖掘机、反铲挖掘机、索式挖掘机、抓斗挖掘机等。

正铲挖掘机 铲斗向前推进的作业方式，主要用来挖掘停机坪以上的掌子面（即开挖工作面）。挖掘和推压能力较大，生产率高，可直接装车外运，适于挖掘土与砂砾石，或爆破后的岩石。斗容一般为 $0.5 \sim 10 \text{ m}^3$ 。

反铲挖掘机 铲斗向后掘进的作业方式，主要用来挖掘停机坪以下的掌子面，可就地甩土或装车，适用于中小型沟渠、坑槽及方量不大的基坑土石方开挖，也可挖掘水下砂石料。斗容一般为 $0.2 \sim 2.0 \text{ m}^3$ 。

索式挖掘机 也称索铲或拉铲挖掘机。是铲斗作挠性连接的最常用的一种型式，宜于挖掘停机坪以下且有一定距离的掌子面，适于就地甩土，亦可装车，并能适应水下部位作业。其挖掘能力受铲斗自重的限制，一般只能挖掘土与砂砾石。斗容一般为 $0.5 \sim 14.0 \text{ m}^3$ 。

抓斗挖掘机 铲斗成抓斗型，可在提升高度和挖掘深度范围内用来挖掘停机坪以上或以下的掌子面。能开挖水下土方和石渣。适用于井下及槽孔开挖和下水下清基、清淤等工程。斗容一般为 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}^3$ 。

多斗挖掘机 是一种由若干个挖斗连续循环进行工作的挖掘机械，主要用在挖取土方或开挖沟渠，剥离采料场或露天矿场上的覆盖及装卸松散材料等作业。此种机械在无端链或斗轮上装有多只挖斗，土体不断被挖取并不断被运出，因此它的作业进程是连续进行的，与单斗挖掘机相比，它具有连续作业、生产率高、动力消耗少、自重轻及操纵比较简单的特点。多斗挖掘机按工作装置不同可分为链斗式和斗轮式两种。

链斗式挖掘机 其特点是挖斗连接在挠性构件（斗链）上，依靠斗和斗链的运动，进行挖掘土体，并把土带出掌子，经转载输送装置将其卸至堆弃地点或外部运输设备上。链斗动臂是可以摆动的。链斗式多斗挖掘机可进行上采（掌子面位置高于停机坪），也可进行下采（掌子面位置低于停机坪），以下采式作业居多。此种机械挖掘深度可达 40 m ，挖掘高度达 27 m ，斗容量达 2500 L 。

斗轮式挖掘机 其特点是挖斗装在刚性的斗轮上，工作时轮斗不断旋转，机体不断移动或动臂不断回转，挖斗在自下而上的转动过程中挖取土方，当挖斗转到上部位置并开始向下运动时，土从斗中卸出，通过胶带输送机将其运出，可就近卸土或装车外运。适用于大量土方开挖工程及土料开采。此种挖掘机挖掘高度为 $4 \sim 20 \text{ m}$ ，下挖深度为 $0.25 \sim 3.0 \text{ m}$ ，斗轮直径为 $2.4 \sim 6.125 \text{ m}$ ，斗容量为 $45 \sim 350 \text{ L}$ 。美国渥洛维尔坝（Oroville）施工中，为开挖砾卵石土料，在采料场上布置了二台斗轮式挖掘机，转轮直径 9.1 m ，有 8 个挖

斗，每个斗容为 1380 L ，挖掘机的生产能力为 $4360 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

装载机 它主要用于挖装和搬运土石方和松散物料，更换工作装置后，还可以进行推土、起重和装卸等多种作业，是一种机动性很好的高效机械，在工程施工中越来越得到广泛的应用。装载机按行走机构的不同分为轮胎式与履带式二种。

轮胎式装载机行走速度快、自重轻、机动性好、生产效率高、行走时不破坏路面，并可在短距离工作场地内自行搬运。履带式装载机的灵活性较差，接地比压小，对场地地面的适应性和对道路的通过性能好，且由于对地面的附着性能好，所以其牵引力和对掌子面的单宽切入力比较大。装载机铲斗容量有 $1 \sim 14.9 \text{ m}^3$ 多种。

铲运机 一种循环作业式的铲土运输机械，主要用于中距离的大规模土方挖填工程。它能综合完成铲土、装土、运土和卸土等四个工序，能控制填土铺撒厚度和进行平土作业，对卸下的土料进行局部碾压。适用于无地下水影响的渠道开挖、堤坝填筑、场地平整、土料开采等土方工程施工。铲运机有拖式与自行式二种。斗容一般为 $2.5 \sim 15 \text{ m}^3$ ，大者达 57.5 m^3 。

推土机 一种自行式铲土运输机械。可独立进行铲土、推运或配合其他机械工作。运距不宜超过 $50 \sim 80 \text{ m}$ 。适用于出渣集料、清理覆盖、土料开采、坝面铺土、平整场地及开挖不深的渠道等工程。按推土板操纵方式不同，分为机械操纵和液压操纵二种。按行走机构不同，又可分为履带式与轮胎式二种。由于履带式推土机在松软潮湿和坚硬的岩石等各种恶劣的场地条件下均能适应工作，并能发挥出较大的推力，所以在施工中应用最广泛。常用的推土机功率有 $39.7 \sim 294 \text{ kW}$ 多种。

在大型履带式推土机的后部可根据需要加配液压松土器（又称裂土器），用于劈开或疏松硬土和冻土层，也可松动风化的和裂隙、节理发育的软岩石。

挖泥船 在水利水电工程施工中，挖泥船是水下土石方开挖的主要机械。它常用于河道疏浚、渠道和基坑开挖、堤坝围堰填筑和拆除，砂石骨料采掘等工程。挖泥船根据工作机构原理和输送方式的不同，分为机械式和水力式两大类。

机械式挖泥船是以机械周期切泥，机械提泥，即用各种斗或铲，挖取并从水下提送疏浚物，如链斗式挖泥船、抓斗式挖泥船和铲扬式挖泥船等均属此类。其中将链斗式挖泥船略加改进，即可成为采掘砂石料的采砂船。

水力式挖泥船是以水力或机械连续切泥，水力提泥，如以高压水枪冲泥、绞刀或耙头切泥后，使水和疏



浚物混合而成为泥浆,被离心泵吸取,经由管道或其他方式从疏浚现场输送并排放到卸泥地点,由于它的吸入和扬出作用,所以又称吸扬式挖泥船。此类挖泥船包括耙吸式挖泥船、绞吸式挖泥船和无绞刀式挖泥船三种。

挖泥船的划分有用舱容、斗容或用生产率来标志两种方式。如用舱容划分的有 800 m^3 、 4500 m^3 耙吸式挖泥船;用斗容划分的有 4 m^3 铲扬式挖泥船;用生产率划分的有 $40\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $80\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $350\text{ m}^3/\text{h}$ 绞吸式挖泥船及 $150\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $250\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $500\text{ m}^3/\text{h}$ 链斗式挖泥船等。

(龚贵煮)

tushifang yashi jixie

土石方压实机械 (compacting machine for earth-rock filling) 用重力、振动或冲击功能使土石方加大密实度的施工机械。按压实作用原理,可分为静力碾压机械、振动压实机械和夯实机械三类。

静力碾压机械 主要依靠碾重的静力作用来压实,如羊足碾、气胎碾、平碾、肋形碾、尖齿碾等。

(1)羊足碾。主要通过羊足顶端将碾重传递于土体,其接触面积小,单位压力大,当羊足插入土体时,使其受到挤压及揉搓的联合作用,因而有很好的压实效果和较高的生产率,广泛用于粘性土料的分层碾压。羊足碾可以通过增减碾内配重的办法来调整羊足的单位压力。一般羊足碾的使用总重量为 $5\sim 20\text{ t}$,羊足接触压力为 $2\sim 9\text{ MPa}$ 。

(2)气胎碾。通过充气的柔性轮胎将碾重传递于土体,在碾压时土与轮胎同时变形,开始时,土料很松,轮胎的变形小,土层的压缩变形大,以后随着土料的逐渐压实,轮胎的变形也逐渐增加,使得它们的接触面增大,压力分布均匀,压实效果好。气胎碾适于压实粘性土、砂性土与砂砾料等。气胎碾工作时的重量可根据轮胎充气压力(按土料性质选用)、轮胎个数、轮胎尺寸等因素确定。拖式轮胎碾的结构尺寸和重量较大,加载后的总重一般为 $8\sim 30\text{ t}$,重型的可达 $50\sim 200\text{ t}$ 。

(3)平碾。单位压力较小,压实深度也浅,但结构简单,可用来碾压对设计干容重要求较低的土料、砂砾料与风化料等。

振动压实机械 利用静力与振动力的联合作用进行压实的机械,如振动平碾、振动凸块碾等。

(1)振动平碾。主要依靠碾轮沿被压实材料表面既作往复滚动,又以一定的频率、振幅振动,使被压层同时受到碾轮的静压力和振动力的综合作用达到密实,以提高压实效果。它适宜于压实非粘性土(砂土、砂砾石)、碎石、块石和干硬性混凝土,也可用于沥青混凝土碾压。振动碾有拖式与自行式两种。在土石坝施工中

较多采用碾重为 $5\sim 15\text{ t}$ 的振动碾。一般认为,压实非粘性土和半粘性土的振动频率以 $1200\sim 2500\text{ 次}/\text{min}$ 为宜。

(2)振动凸块碾。压实原理与振动平碾相同,其足形多采用凸块形,适于压实含水量不大的粘性土和细颗粒砂砾石,以及碎石与土的混合料。

夯实机械 主要依靠冲击能量压实,如夯板机、蛙式打夯机、内燃夯实机等。

(1)夯板机。一种用单斗挖掘机改装的夯实机械。它是由主绞车将重 $2\sim 2.5\text{ t}$ 的圆形铸铁夯板,吊起 $2\sim 4\text{ m}$ 高,然后松开离合器,夯板自由下落,产生的动能以冲击形式作用在土体表面,使土体得以压实,适宜于压实砂砾料、细粒堆石与砾质土。

(2)蛙式打夯机与内燃夯实机。均为手扶操作的轻便夯实机械,适用于狭窄的沟槽回填或大型碾压机械不能到达的地段进行压实作业。

(龚贵煮)

tushiliao kaicai

土石料开采 (earth and rock excavation)

在选定的料场开挖土、砂砾、石料并加工成合格建筑材料的施工过程。水电站的土石料开采包括筑坝的土、砂砾、石、反滤料;用于制备混凝土的粗、细骨料;防渗墙施工槽孔固壁用粘土料等的挖装、加工、运输工作。

土石料场通常选场面宽、料层厚、储量集中、质量好、获得率高、运输方便、运距短、占用耕地或林地少的大料场作为主料场,布置运输干线,配备主要开采及运输设备,以发挥机械化施工特点。其余分散料场,可按不同位置、储量、质量及施工期水位变化情况,作为辅助料场。所有料场开采前,要做好料区排水,清除植被等工作。弃料堆置在不影响环保和不抬高尾水的场所。开采料物,尽量避免或减少复杂加工和中途堆存倒运,力求总运输量最小,工程造价最低,弃料最少。

土料开采(见土方开挖) 开采前,料场周围除布置截水沟外,还要根据地形、料场面积及开采时段的降雨强度布置场内的排水系统。土料开采分平面开采和立面开采。①平面开采多用铲运机、推土机、装载机配合有轨矿车、自卸汽车或带式输送机等薄层平面取土。根据中国SDJ338-89《水利水电工程施工组织设计规范》岩土开挖等级十六级分类,平面开采适用于Ⅲ级以下土料,Ⅳ级以上土料要预先刨松。②立面开采,是土料开采中常用的开采方法,用正、反铲单斗挖掘机、斗轮挖掘机、装载机等设备垂直取土,工作面高度视所选挖掘设备性能和土层厚度决定,通常为挖掘设备的最大挖掘高,当土的含粘量大时,可以略小,反之可以

略高。

石料开采（见石方开挖） 常用钻孔爆破法开采。钻孔爆破分浅孔爆破、深孔梯段爆破和洞室爆破。①浅孔爆破，适用于用量不大或要求石料规格较严的采场，用压缩空气为动力的手风钻钻孔，通常孔深不大于5 m。②深孔梯段爆破（见梯段爆破），广泛采用的石料开采方法，用潜孔钻机钻孔，孔深视梯段高度、挖掘机型号和运输设备容量等选定。③洞室爆破（见洞室爆破），根据地形、地质、岩性选定集中药包或延长药包爆破，药室大小按装药多少决定。

砂砾料开采 ①水上砂砾料与土料开采方法基本相同（见土方开挖）。当河滩料场地下水位较高时，也有采取截断水源降低水位变水下砂砾料为水上开采。②水下砂砾料，常用反铲、索铲或采砂船开采，但细粒料容易流失。

由于料区地形、地质、水文、气象等因素影响，各料场技术指标很难全部满足设计和施工要求，因此，在开采过程中不同料物常要进行不同加工处理。

土料 最常遇到的是土的含水量处理。土的含水量是最敏感的施工技术指标，尤其对防渗土料要求更为严格（见筑坝材料现场试验）。当土的天然含水量超过施工含水量上限值时，常要采取措施降低土的含水量，多雨地区可预先堆成土牛（即堆放成较规则形状的储备土料堆）晾干，以调节土料上坝强度要求。当土的天然含水量低于施工含水量下限值时，常在料场采取增加土料含水量措施。

石料 料场出现大块爆破岩石时进行浅孔解炮加工。

砂砾料 除少量特大超径料在开采过程中剔除外，超径较多或需分级的砂砾料均需筛分加工。当坝址附近缺乏某种级配的砂砾料时，常用人工破碎超径料或石料配制所缺粒径。

（王守道）

tushiliao tianzhu

土石料填筑（earth and rock filling） 将合格的土、砂砾、石料运至指定位置，按设计要求填筑成建筑物的施工过程。水力发电工程的土石料填筑包括坝体、围堰、防洪堤、路基及各建筑物的基坑回填。根据填筑材料和所填工程不同，填筑工艺和质量要求也各异。

土石料运输 土石料在开采、加工合格后，视料物种类、用量多少和运输条件选择运输方案。一般土石料运输（见运输机械）有无轨、有轨、连续和水力运输四种方式。①无轨运输除距料场较近（<500 m）的土料填筑有用铲运机集挖、装、运、卸于一个工序外，一般

多用自卸汽车运输，其优点是效率高、运量大、运距长、机动灵活，能将各种土石料直接卸至工作面不同位置。②有轨运输运量大、运费低，但运营管理复杂，线路地形要求较高，工程建设投资大，而且料物不能直接卸至工作面。③连续运输常用带式输送机，运输成本低，运输强度高，能适应地形崎岖高差悬殊的料场至工作面的运输任务，从受料至填筑面，散料可以连续作业无空行程，但机动性差，一条带式输送机只能运送一种料物，运输途中一旦发生故障迫令全线停工。④水力运输用高压水泵将开采土料借地形高差或机械能使形成泥浆，将土料直接输入填筑工作面，适用于土料粘粒含量较少，填筑量小，运距短，且有居高临下的有利地形的水力冲填工程。

土石料压实 土石料填筑的密实工序，是工程质量和建筑物安全的关键。在土石料压实过程中的铺料厚度及碾压遍数，一般均需根据材料特性和选用压实设备型号通过碾压试验确定（见筑坝材料现场试验），以保证建筑物达到设计要求的压实指标。当合格的土石料运至工作面后，需按指定位置顺序卸料，再按规定厚度铺平。常用的土石料压实机械有：①依靠碾重的静力作用使土石料结构破坏，颗粒变位挤紧压实，如平碾、羊足碾和凸块碾，适用于细粒料压实。②依靠土料的搓揉、拌和作用驱除土粒间滞留的空气压实，如气胎碾。③依靠机械的振动频率和碾重，使土石料颗粒随之振荡，粒间摩擦阻力减少并发生相对位移，从而缩小颗粒间隙压实，如振动碾。④用重锤下落的冲击动能压实，如各种夯实机械，适用于各种粘性或无粘性土料，常用于防渗铺盖、堤身或坝体，一般铺土较厚，击实次数比碾压遍数少。在大型碾压设备所不能压到的边角和接头等特殊部位，常用小型夯实设备补压密实，如截水槽底部、混凝土齿墙两侧、坝体与岸坡或建筑物连接部位。

坝体填筑 坝体是土石料填筑中填料集中、上坝强度高、填筑方量大和质量要求高的水工建筑物，施工工艺比较复杂。一般要求运输过程不同坝料防止掺混、污染和降低物理力学性能。坝面施工有严密组织和管理，各工序间相互衔接，分段流水；坝体不同高程各部位在施工中有明显标志，坝面层次清楚，大面平整，均衡上升，防止漏压、欠压或超压。根据不同坝料采用下述的填筑方法：①上料。铺土厚度用插杆法或设标志控制，当气候干燥，上表层水分蒸发较快或在运输和散铺过程中含水量损失较大时，铺土与压实表层均要适当均匀洒水润湿，洒水量以能控制在施工含水量范围内为原则。②砂砾料和石料铺料后均要边洒水边碾压，但软化系数大的石料和在负温下施工时一般不洒水。③反滤料填筑质量要求较高，铺料厚度控制较严，一般约

每10 m设厚度样板一个,用机械施工时单层水平宽度大于3~4 m,在坝体中与防渗土料平起成犬牙交错压实,有先土后砂和先砂后土两种施工方法,犬牙交错带宽一般不大于每层防渗土料厚的1.5~2.0倍,在分段铺筑时要做好接缝处理各层间的连接,使不发生层间错位、折断或混杂,对已铺好的反滤层要妥善保护,禁止车辆或行人通行,防止土料混杂和污水浸入。④面板堆石坝的面板后垫层料,要求密实度高而渗透性小,一般采用级配良好的垫料薄层碾压,靠近上游面的松坡,削坡处理或用斜坡碾压设备碾压,施工期间下游排水必须畅通。

(王守道)

tushiliào xiānchǎng niányā shíyàn

土石料现场碾压试验 (in-situ compacting test for earth and rock materials) 见土石坝材料现场试验。

tǔtǐ jiāgù

土体加固 (improvement of soil mass)

对不能满足工程要求的人工填土或天然土体采用物理化学方法进行人工处理,改善其力学性质的工程措施。在建筑物地基处理过程中,除采用桩、地下连续墙、沉箱等深基础外,土体加固处理可提高其强度和稳定性、减小压缩及变形、控制渗流,从而适应工程建筑物安全和正常运行的要求。土体加固处理分为表层处理和深层处理两大类。前者一般涉及表层3~5 m以内的上层,常用的有挖除、换土、垫层、挤淤、压实、挤密桩、树根桩、排水固结、掺胶凝材料等措施。深层软弱土体加固方法主要有排水固结、挤密砂桩、强夯、振冲、高压喷射注浆、深层搅拌、灌浆等项。前4项主要是使土体加密,后3项是以不同方式向土体内加入胶凝材料,使其固化。其他还有冻结法、热处理法、电渗排水法、电化学加固法等,可在特殊条件下采用。20世纪70年代以来用土工合成材料加固土体已得到很大发展。

排水固结 近代沉积的高含水量低密度软粘土层,一般都处于欠压密或正常压密状态,力学性质很差。在土体自重或外载荷作用下,使土体预先排水固结,可以提高土的密度和粒间有效应力,降低欠压密程度,从而提高强度,减小压缩性。因软粘土渗透性弱,不易固结,常在土体中设置砂井、土工排水板等,以缩短渗径,改善排水边界条件,加速固结过程。用堆载、抽真空、降低地下水位等措施对土体进行预压,可以提高土体稳定性,消除或减少建筑物的沉降。一些对沉降不太敏感的建筑物,如堤坝、路基、油罐等,也可以用控制施工速率或加载速率的方法,使软土上的强度增长

与加载过程相适应,保持软土地基的稳定性。

挤密砂桩 用振动打桩机将带有桩靴的钢套管打入土体内,边拔管,边灌砂,并用振动或捣实法压实,形成密实的桩柱体,与周围被挤密的土体一起,组成复合地基,以提高地基承载力。桩体材料也可用土或灰土,形成土桩或灰土桩复合地基。这种方法对松砂、非饱和松散粘性土、湿陷性黄土等的挤密作用是明显的。对饱和软粘土地基,其挤密作用不大,但较高的置换率(例如30%~70%)使砂桩在复合地基中起主要作用,同时也有利于土体的排水固结。

强夯 以重锤在大落高下夯击地面,使土体在巨大冲击能量下压密,以提高强度,减小压缩性。其有效深度取决于夯击能量,可达10 m以上。对易液化的饱和松砂,强夯可使土体液化,土粒在重新沉积过程中排列得更为密实。对低密度的非饱和土体,如湿陷性黄土、未经压实的填土、松散无粘性土等,强夯可使松散土体压实。对饱和软粘土配合排水后是否适用尚无一致意见。强夯法施工时振动大,在附近有建筑物的地区要慎用。

振冲 使振冲器在边冲水、边振动作用下沉入土体,至预定深度,然后在边振动、边上提过程中,将砂石料填入振冲形成的孔洞内,并借振冲器的振动作用压密填料,形成砂石桩柱,与周围被振冲、压密的土体一起组成复合地基,提高地基承载力。对无粘性土,主要是振冲加密作用;而对粘性土,则主要是振冲置换作用。振冲法的适用范围与振冲器的功率有关,一般20~30 kW的振冲器可用于砂层和粘土层,而70 kW的大型振冲器可用于砂砾石层。

高压喷射注浆 用高压将水泥浆液通过钻孔底部的喷嘴喷入地层,与被高压射流切割破碎的地层材料混合,边旋转,边提升,边喷射浆液,直至地面。经一定时间后,混合物硬化而成一定直径的桩体,称为旋喷桩,可以与周围地层材料组成复合地基,也可连续成排,作为基坑的围护结构或地基防渗结构。如喷嘴只在一定角度内摆动而不作旋转,可以喷成一定厚度的板墙,作防渗帷幕,称为定喷或摆喷。

深层搅拌 用特制的钻头,在钻孔中一定深度处借机械力量旋转切削土体,同时将水泥或石灰的粉体或浆体通过空心钻杆和钻头上的喷嘴,在压力下喷入土体中,与被切割破碎的地层材料混合均匀,边旋转,边提升,直至地面。在一定时间后混合物凝固成桩体,与原地层一起组成复合地基,以提高地基的承载力。

灌浆 通过钻孔将水泥或其他浆液,在静压力下灌注入地层的裂隙或孔隙内,固化而成具有一定强度和低透水性的结石,起加固和防渗作用,其应用极为广泛,技术上也有很大发展。(见灌浆)



参考书目

曾国熙等主编. 地基处理手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988

(蒋国澄)

tuti wendingxing

土体稳定性 (stability of soil mass) 土体的一部分抵抗另一部分在自重和外载荷作用下沿着潜在滑裂面发生剪切破坏的安全程度。土坡稳定性、地基承载力和挡土结构稳定性,都属于土体稳定性范畴。常用的确定土体稳定性的方法是极限平衡法。

土坡稳定性 天然的、人工填筑的和开挖的土质边坡抵抗沿潜在滑裂面发生滑坡的安全程度。在无粘性土坡中滑裂面的形状近似于直线,而在粘性土坡中则呈曲线或复合形状。常用的土坡稳定性分析方法是刚塑体极限平衡法,其中条分法应用最为广泛。它最早由瑞典人 K. E. 彼德森 (K. E. Petterson) 提出,通常称为瑞典条分法。此法假定土体稳定性是平面应变问题,滑裂而是圆柱面,将滑动土体分成若干垂直土条,不考虑土条间的作用力,见图 1。滑裂面上的全部抗滑力与滑动力之比,即土坡的稳定安全系数 F_s ,可以由下式表示

$$F_s = \frac{\sum [c' l + \text{tg} \varphi' (W \cos \alpha - ul)]}{\sum W \sin \alpha} \quad (1)$$

式中 c' , φ' 分别为有效粘聚力和有效内摩擦角。

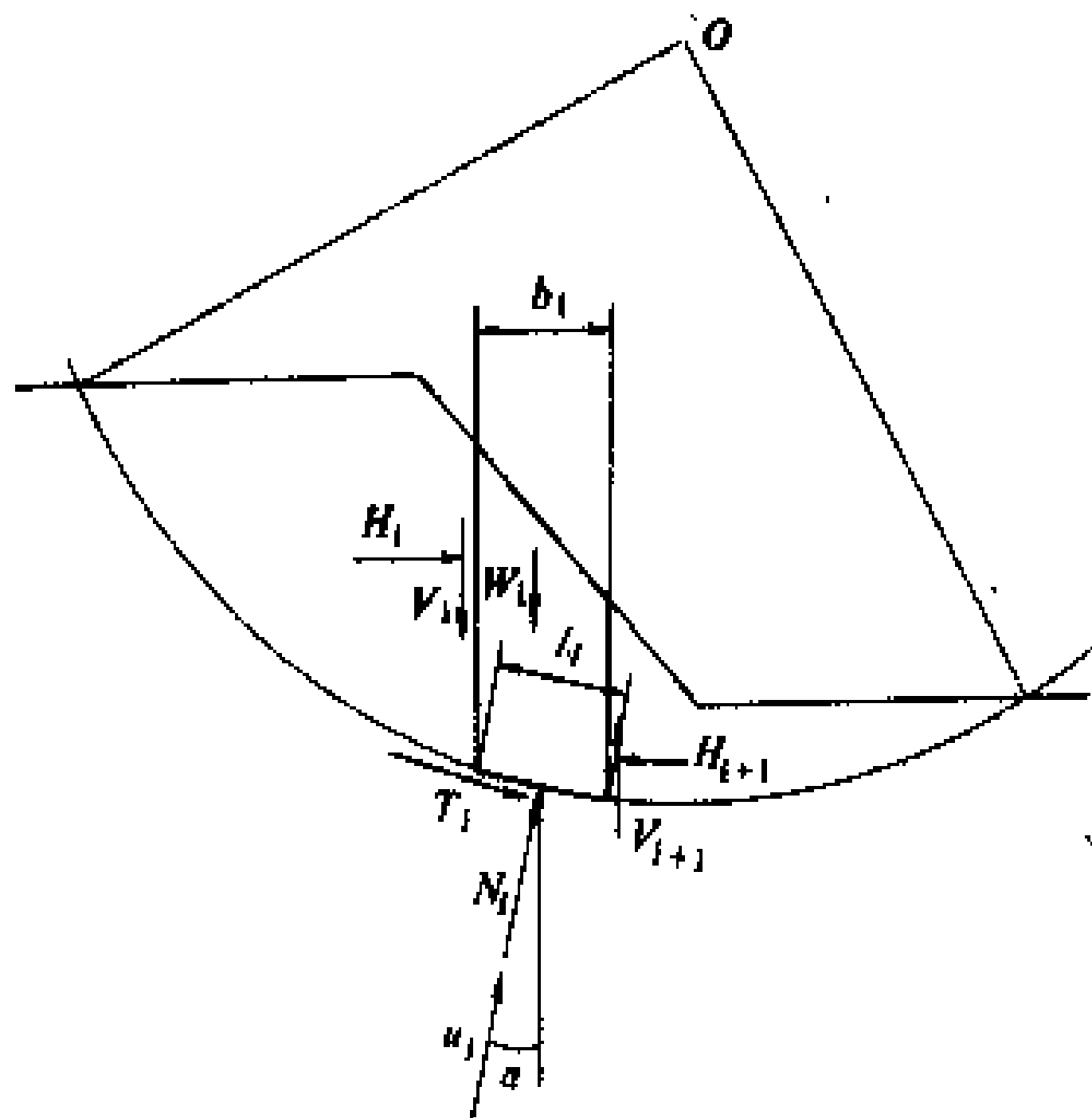


图 1 滑动土条上的作用力

W_i —土条自重; V_i , H_i , V_{i+1} , H_{i+1} —条间力; N_i —径向反力; T_i —切向反力; u_i —孔隙压力; b_i —土条宽; l_i —土条底边长; α —倾斜角

实践表明上式往往给出偏小的安全系数值,且孔隙水压力愈大,误差愈大。目前已发展了许多考虑条块间作用力的方法,其中以摩根斯坦-波赖斯 (Mogenson-Price) 法最为严格,它导出了满足静力

平衡和变形协调的微分方程,再根据边界条件求解,但计算工作量大,必须用计算机实施;简化毕肖普 (A. W. Bishop) 法较为简便,它假定土条间作用力的合力呈水平方向,其安全系数的表达式为

$$F_s = \frac{\sum [c' b + (W - ub) \text{tg} \varphi'] / \left(\cos \alpha + \frac{\text{tg} \varphi' \sin \alpha}{F_s} \right)}{\sum W \sin \alpha} \quad (2)$$

经多次迭代求解,计算结果与其他严格方法很接近,因而为目前工程上常用的方法。

从 20 世纪 60 年代开始研究用有限元法算出土坡内各点的应力和应变,然后将滑动面上的剪应力和剪应变分别与抗剪强度和允许剪应变相比较,算出安全系数值,但在实际工程中尚少应用。

土坡稳定分析时,需试算若干滑动面,求出安全系数最小的滑动面,即最危险滑动面,以及相应的安全系数最小值,它必须大于规定的数值,以保证一定的安全储备。如果稳定安全系数不够或发生滑坡,应考虑放缓边坡,以降低土体内的剪应力,或采取减小土体内孔隙压力的措施以及其他加固措施。

地基承载力 地基在自重和外载荷作用下抵抗剪切破坏的能力。地基土的一部分沿着图 2 中的滑裂面

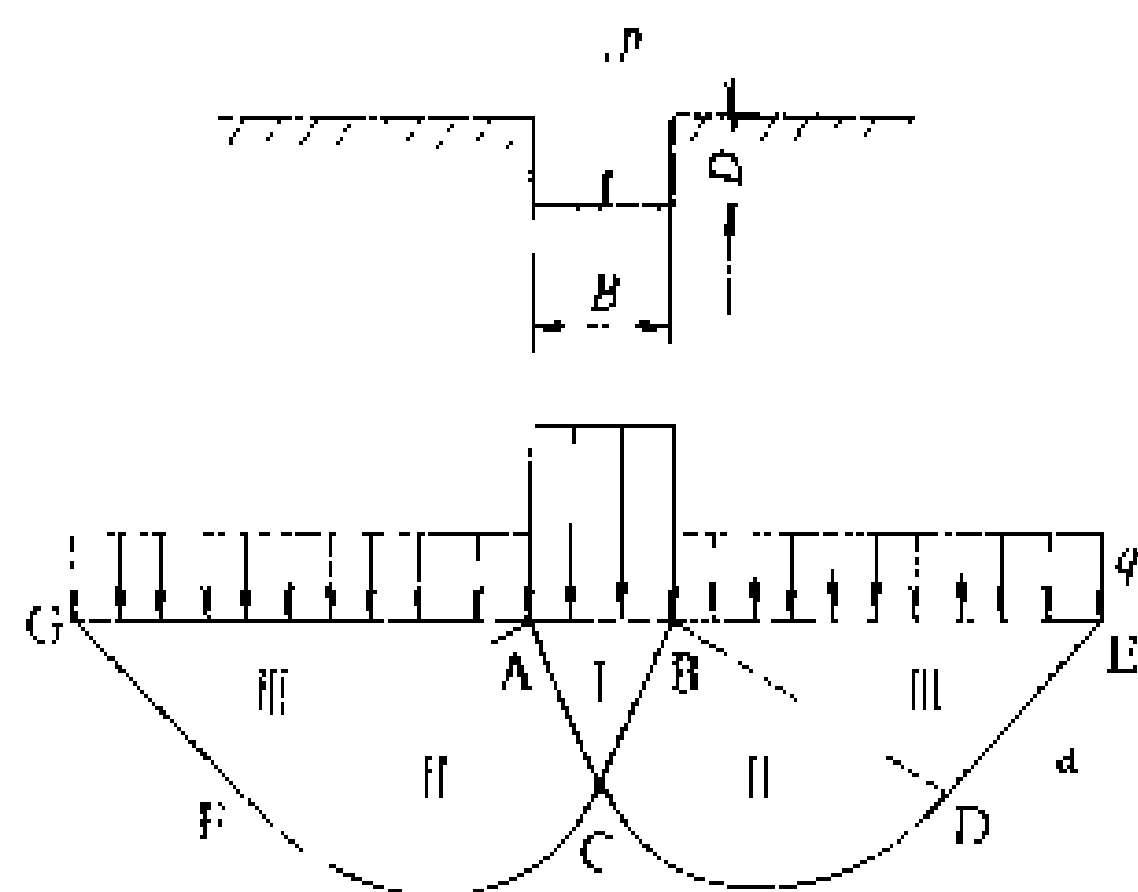


图 2 地基滑动面

I, II, III—极限平衡区; a—滑裂面; p —基础载荷;
D—基础埋置深度; B—基础宽度

发生剪切破坏前的最大载荷称为极限载荷,此时地基对基础的反力称为地基的极限承载力。极限载荷可根据极限平衡理论求解,但由于影响因素很多,目前尚无严格的一般解析解。国内外学者在不同假定的基础上提出了很多计算极限承载力 q_{ult} 的公式,但都可以写成以下基本形式

$$q_{ult} = N_c c + N_q q + N_\gamma \frac{B}{2} \gamma \quad (3)$$

式中 c 为土的粘聚力; γ 为基础底面以下地基土的密度; q 为旁侧载荷; N_c , N_q , N_γ 是承载力系数,与土的内摩擦角 φ 有关。承载力系数的各种公式的计算结果很不一样,但当 φ 小于 30° 时差别相对减小,在生产实践中应用较多的是太沙基公式和汉森公式。将极限



承载力除以 2~3 的安全系数后得地基的容许承载力。采取地基加固措施,增加土体的抗剪强度是提高地基承载力的有效措施。

挡土结构稳定性 挡土结构在自重、外载荷及土压力作用下抵抗滑动和倾覆的安全程度。它在很大程度上取决于作用在挡土结构上的土压力。挡土结构一般分重力式和悬臂式两类,前者靠自重保证其稳定性,而后者靠自重及结构物后面底板上的土重来保证其稳定性。

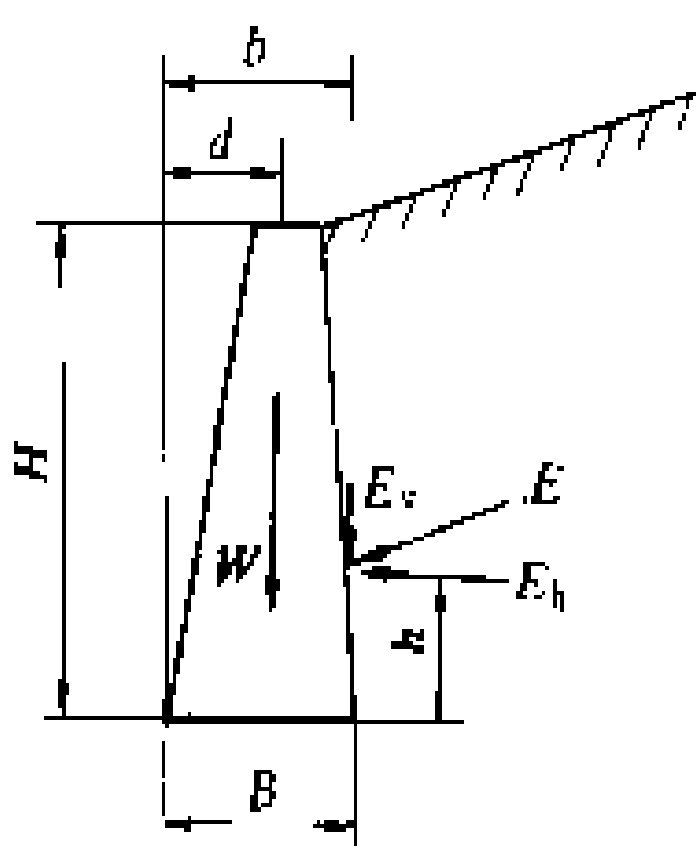
(1) 抗滑稳定性。用抗滑力与滑动力的比值 F_s 表示其安全度

$$F_s = \frac{(W + E_v) f}{E_h} \quad (4)$$

(2) 抗倾覆稳定性。用稳定力矩和倾覆力矩的比值 F_s 表示其安全度

$$F_s = \frac{Wd + E_v b}{E_h h} \quad (5)$$

式中 W 为挡土结构自重; f 为基底摩擦系数; E_v, E_h 分别为土压力 E 的垂直和水平分量,其余符号见图 3。



挡土结构有许多新型式,如锚定板式、锚杆式以及加筋土挡土结构等,其稳定分析方法各具特点。

(李锦坤)

tuti yehua

土体液化 (liquefaction of soil mass) 饱和土体在静力、渗流、尤其是动力(主要是地震)作用下,因严重丧失抗剪强度而向液体状态转化的一种现象。它是由于土体在不排水条件下(或者是由于渗流比降的增加)受剪力作用时体积趋于收缩,引起孔隙水压力升高,使土骨架上的有效应力降低以至消失所致。

土体液化类型及其危害 土体液化分为完全液化、间歇性液化及流土三种类型。①完全液化,松散土体在很大剪应变下仍处于剪缩状态,使土的强度几乎丧失,在静力剪切或循环剪切下都会引起无限度的流动。它多发生于饱和、疏松、排水不畅的无粘性土或少粘性土中,常见于地震烈度 6 度以上的地震区,表现为土体表面喷水冒砂、上部建筑物的严重开裂、沉陷或倾覆,以及土坡的流动性滑坡等,可对工程造成严重危害。②间歇性液化,对于密实土体,剪应变增大会使土体因剪胀而产生负值的孔隙压力,导致强度部分恢复,这时在循环剪切作用下会产生以有限变形为特征的间歇性液化,它对工程的危害要比完全液化的小得多。③

流土,因渗流的水力比降达到临界比降所发生的一种液化现象(见渗透变形)。

土体液化势评估 液化势指土体潜在的发生液化的可能性。影响土体液化势的内部因素有土的组成、密度、结构性、应力状态与应力历史等;外部因素有土体的埋藏与排水条件、振动的强度、历时与频率等。由于影响因素复杂,目前难以精确评估。一些简单方法都建立在工程经验基础上,分别以土体的地质年代、颗粒组成、相对密度、标准贯入击数、液性指数或剪切波速等以及地震烈度作为判别依据。进一步评估土体液化势的方法,以现场和室内动力特性试验提供的高质量土质参数为基础,进行动力反应分析,做出评价。此外,振动台模型试验和离心机模型试验也能提供定性或定量的分析。

土体液化防治 防止土体发生液化及其对工程的危害,可以从改良土性、压密土体、改善排水条件和应力条件以及防止土体流动等方面采取措施。常用的措施有换土、振动压密、排水、压重和围封等(见土体加固)。

(俞培基)

tuti yingli yingbian fenxi

土体应力应变分析 (stress-strain analysis of soil mass)

根据土力学理论,确定土体在自重和外载荷(建筑物的静、动载荷,渗透水压力,地震载荷等)作用下产生的应力和位移的方法。通过分析了解土体和建筑物地基的变形或不均匀沉降是否超过允许值;了解土的拉力区和剪切破坏区的分布和规模;评价在土体中出现裂缝、水力劈裂和整体失稳的可能性。进行土体应力应变分析时,要建立土的应力应变关系的数学模型,提出分析计算方法,并对计算成果进行实际验证。

土的应力应变关系模型 土的应力应变分析成果的合理性很大程度上取决于对土的力学性质的了解和模拟。因此,许多学者开展了土的应力应变关系模型及计算参数的试验研究,提出了多种弹性、非线性弹性、弹塑性等本构模型,并对其适用条件及影响因素作了系统研究。目前,水利水电工程中较多采用的是双曲线非线性 $E-\mu$, $E-B$ 应力应变模型。弹塑性本构关系的研究取得了一定进展,已达到实用阶段。

土体应力应变分析方法 进行土体应力应变分析的主要手段是解析法或数值计算方法。早期的研究将土看作弹性体,采用经典的弹性力学方法。例如,在计算地基的应力分布时广泛应用了 J. V. 布森涅斯克(J. V. Boussinesq)对点载荷作用下的均匀、各向同性的弹性半无限空间应力应变的理论解。近代,数值分



析方法(有限元法、边界元法等)得到广泛的应用,使应力应变分析能更全面地考虑土的力学特性;可以处理复杂的边界和土层条件;可以模拟土体的开挖、填筑等施工过程;可以通过设置接触面单元来模拟土和建筑物的相互作用;并且可以求解包含时间因素的固结、动力计算这样的复杂课题。在水利水电工程中,有限元法被广泛应用于计算土石坝及其混凝土防渗面板、防渗墙的应力和应变,确定在地震载荷下土石坝的动剪应力、孔隙水压力和永久变形。

在进行土的应力应变分析的同时,应尽量创造条件,进行原型观测,验证计算成果的合理性,校核、修正或反演计算参数,使应力应变分析成果更加符合实际。近代土工离心模型试验技术的发展,为验证土的本构关系和数值分析方法的合理性提供了重要手段,同时也开辟了一条使用物理模型研究土的应力应变的新途径。

(陈祖煜)

tu yoli

土压力 (earth pressure) 由土体自重或载荷产生的作用于土体内部或土体作用于结构物上的压力。土压力有侧向土压力和竖向土压力两类。在设计挡土结构物和土中埋管时必须确定土压力的大小、方向和分布。

侧向土压力 挡土结构物上的侧向土压力随结构物的位移方向与大小而变化。结构物静止不动时,它所承受的土压力称为静止土压力;结构物离开土体,其后土体处于破坏状态时的土压力称为主动土压力;结构物挤压土体,使其后土体处于破坏状态时的土压力称为被动土压力。根据极限平衡理论,以及不同的简化假设,发展了许多计算主动和被动土压力的理论与方法。其中最常用的是 W. J. M. 朗肯 (W. J. M. Rankine) 和 C. - A. de 库仑 (C. - A. de Coulomb) 理论。它们均设墙后土压力呈直线分布,砂土在自重下的侧向土压力表示为

$$P_p^0=K_p^0\times\frac{1}{2}\gamma H^2 \tag{1}$$

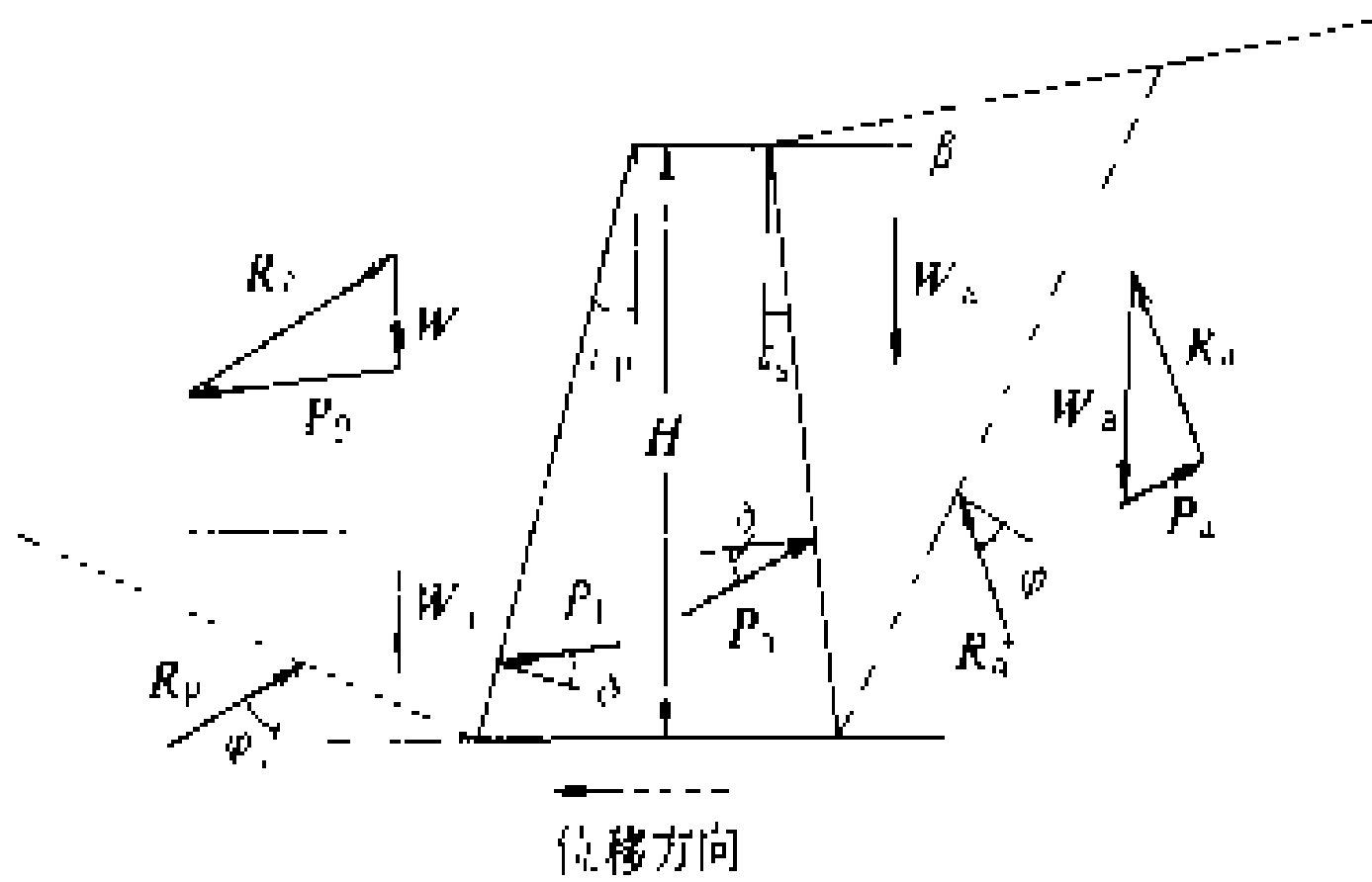
式中 γ 为土的密度; H 为墙高; K_a 、 K_p 分别为主动和被动土压力系数。图示库仑理论通过假设的滑动楔体的力的平衡,确定刚性挡土墙上砂土的主动和被动土压力,得到

$$K_p^0=\frac{\cos^2(\varphi+\epsilon)}{\cos^2\epsilon\cos(\delta\pm\epsilon)\left[1\pm\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin(\varphi\mp\beta)}{\cos(\delta+\epsilon)\cos(\epsilon-\beta)}}\right]^2} \tag{2}$$

式中 φ 为土的内摩擦角; δ 为土与墙表面摩擦角; β 为填土表面坡度; ϵ 为墙背与垂直线的夹角。当墙背垂直光滑,填土表面水平时,式 (2) 变成朗肯土压力系数

$$K_p^0=\operatorname{tg}^2\left(45\mp\frac{\varphi}{2}\right) \tag{3}$$

对粘性土以及填土上置有超载,特别是填土具有复杂的几何形状时,采用图解法求土的主动和被动土压力比较简便。即将若干滑动楔体的力矢图顺序画在一起,确定临界楔体和相应的土压力。



滑动楔体的力的平衡示意图

W_a 、 W_p 主动和被动滑动土楔重量; R_p —滑动面上的抗剪强度; P_a 、 P_p —主动和被动土压力

竖向土压力 作用于土中埋管上的竖向土压力与埋土方式有关。在地基中挖沟铺设,而后埋土的管道称为沟埋式管。由于沟壁对填土的摩擦力,使管上的竖向土压力小于其上覆土重。在天然地基上直接铺设后填土的管道称为上埋式管。由于管道两侧填土沉降较大,对管上填土有向下摩擦力,使管上竖向土压力大于管道的上覆土重。在土体中水平穿洞而埋设的管道或隧洞,其上竖向压力常用塌落拱理论计算。

土压力的影响因素 柔性挡土结构物上土压力的分布和大小受结构物柔性变形影响。地震作用将使挡土墙上的主动土压力增加,被动土压力减小;且使土压力分布不再为直线,使合力作用点抬高。粘性填土的膨胀性和流变性、填土的湿度和温度、冰冻及地下水位变化、施工程序等对土压力均有影响。锚固设施和土工合成材料等新工艺和新材料的应用,也给土压力问题提出新的课题。20 世纪 60 年代以来,人们开始用各种土的本构关系数学模型和界面模型通过有限单元法,考虑土与结构物的共同作用,确定土压力的大小与分布。

(李广信)

tuiyizhi nisha

推移质泥沙 (bed load) 在一定水流条件下,沿河床滑动、滚动或跳跃前进的泥沙,一般多为粗沙、砾石和卵石等粗颗粒。河床泥沙除受重力和浮力作用外,促使床面泥沙起动的主要是床面水流的上

举力和平行于水流的拖曳力(或称推移力),故推移质泥沙的输移或静止主要决定于床面流速。由于床面流速的脉动性和泥沙颗粒在床面所处位置的不同,推移质泥沙运动具有随机性和间歇性,其速度小于水流速度。

推移质的运动 推移质的群体运动常以沙波形式出现。当水流速度大到一定程度,受水流的紊动作用,部分较细的推移质泥沙被冲起卷入到水流漩涡中,随水流悬浮运动,成为悬移质泥沙。一旦水流强度减弱,悬移质中较粗的泥沙又会沉落到床面成为推移质。虽然推移质与悬移质所遵循的运动规律不同,但二者不能截然分开,在一定水流条件下,二者可以互相转换。划分推移质与悬移质在实际工程中有重要意义。因这两种泥沙的运动机理不同,在工程中造成的问题和处理的措施也不同。如挟沙水流进入水库后,推移质泥沙多淤积在水库淤积三角洲的尾部段,而悬移质则成为三角洲顶坡段和前坡段淤积物的主体。当降低库水位冲沙时,一般对悬移质淤积物较为有效,而推移质淤积物则不易冲刷。

推移质输沙率 单位时间内通过平衡河段的推移质数量。常用的单位是 kg/s 或 t/s。在一定的水流条件下,预报河流的推移质输沙率是水利水电工程人员的重要课题之一,但迄今国内外尚未很好解决,一方面是对推移质运动规律认识不够,另外,还缺乏精确地测量推移质输沙率的工具和方法。目前主要有 5 种探求推移质输沙率公式的途径。

(1)以大量试验资料为基础推导的公式,以迈耶-彼德(Meyer-Peter)公式为代表

$$g_b = \frac{\left[\left(\frac{n'}{n} \right)^{1/2} \gamma h J - 0.047(\gamma_s - \gamma)d \right]^{3/2}}{0.125 \left(\frac{\gamma}{g} \right)^{1/2} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} \right)}$$

式中 g_b 为推移质单宽输沙率, t/s; n 为曼宁糙率系数; n' 为河床平整情况下的沙粒曼宁糙率系数; γ 和 γ_s 分别为水和沙粒的重率; h 为水深, m; J 为河流坡降; d 为沙粒直径, mm。

(2)通过一定的力学分析建立起来的理论公式有 R. A. 巴格诺尔德(R. A. Bagnold)公式

$$g'_b = \frac{u_* - u_{*c}}{u_*} \times \frac{\tau_0 u}{\lg \alpha} \left[1 - \frac{5.75 u_* \log \left(\frac{0.4h}{md} \right) + \omega}{u} \right]$$

式中 g'_b 为以水下重量计的推移质单宽输沙率; u_* 为摩阻流速; u_{*c} 为起动摩阻流速; τ_0 为水流作用在床面上的剪切力; α 为摩擦角; m 为与水流强度有关的系数; ω 为泥沙沉速; u 为流速。

(3)采用概率论与力学相结合的办法建立的公式,

如 H. A. 爱因斯坦(H. A. Einstein)公式

$$1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{(-B_* \phi - 1)/\eta_0}^{(B_* \phi - 1)/\eta_0} e^{-t^2} dt = \frac{A_* \phi}{1 + A_* \phi}$$

式中 $\phi = \frac{g_b}{\gamma_s} \left(\frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{gd^3} \right)^{1/2}$ 为推移质输沙强度函数;

$\psi = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \times \frac{d}{R'_{*J}}$ 为水流强度函数(R'_{*J} 为与沙粒阻力有关的水力半径); t 为水流将泥沙举起完全脱离床面的时间; 常数项 η_0 , A_* , B_* 通过试验求得, 分别为 $1/\eta_0 = 2$, $A_* = 43.5$, $B_* = 0.143$ 。

(4)以爱因斯坦或巴格诺尔德的某些概念为基础,通过量纲分析而得到的 F. 恩格伦(F. Engelund)公式

$$g_b = \frac{9.3 d \gamma_s}{\beta \sqrt{\Theta}} u_* (\Theta - \Theta_c) (\sqrt{\Theta} - 0.7 \sqrt{\Theta_c})$$

式中 β 为动摩擦系数; $\Theta = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d}$ 为决定推移质运动强度的水流参数(τ_0 为作用在周界上的剪切力); Θ_c 为泥沙起动的 Θ 值。

(5)用平均流速作主要参数的 Г. И. 沙莫夫(Г. И. Шамов)公式

$$g_b = 0.95 d^{1/2} \left(\frac{u}{u_c/1.2} \right)^3 (u - u_c/1.2) \left(\frac{d}{h} \right)^{1/4}$$

式中 u 为断面平均流速; u_c 为泥沙的起动流速。

参考书目

钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学. 北京: 科学出版社, 1983

(姜乃森)

tuoshui duan

脱水段 (dehydrated section of river) 拦河筑坝后下游河道出现断流的河段。

水电工程使下游河道出现断流的主要原因有三种。①承担系统调峰任务的水电站, 机组停机时, 下游河道一段距离内出现断流。②引水式电站, 从大坝到厂房一段距离内的河道, 在大坝无弃水, 中间河段又没有来水补给时, 将断流。③跨流域引水发电工程, 调出流域坝下河道一段距离内有可能全年或部分时间断流。

水电工程脱水段对环境的影响主要有: ①对水生生物的影响。脱水段内的水生生物将难以生存。②对工农业生产和人民生活的影响。脱水段内如果有城镇居民点和农田需从河道取水, 将因河道断水而影响用水需求。③对航运、过木和地下水补给的影响。如果河道在兴建工程前有一定的通航、漂木能力, 或者下游有通航条件, 将因脱水使船只无法通行, 木材无法漂运; 如果兴建工程前下游沿河两岸地下水从河道补给, 将因脱水段断水而影响地下水的水位。④对河道稀释自净



能力的影响。在正常情况下,河道内有一定的稀释自净能力,一旦断水,将因河道无水流动而失去稀释自净的作用。除此之外,有的地方对脱水段周围气候还带来一些影响。

如果下游河道脱水段内有珍稀水生生物,或者工

农业生产、人民生活、航运、漂木、地下水补给以及河道稀释自净能力等对水都有一定要求,就要做出满足生态环境用水和航运、漂木等需要的最小保证流量的分析论证。

(刘峻德)



waiqiaji

外加剂 (additive) 为改善混凝土及水泥砂浆的性能,掺入的少量有机或无机化合物。外加剂是配制混凝土及水泥砂浆的重要辅助材料,产品多数为粉剂或液体,使用时需加水调合或稀释。

外加剂的分类 外加剂按其性能可归纳为以下几类:①改善流态混凝土和易性起减水作用,如减水剂、塑化剂、加(引)气剂等。②改善混凝土含气量起表面活性作用,如引气剂、发泡剂等。③改变混凝土凝结与硬化速度,如早强剂、缓凝剂、速凝剂等。④增强混凝土某些物理性能,如抗冻剂、防水剂、防霜剂、染色剂等。⑤减少混凝土硬化过程中体积收缩如膨胀剂等。⑥提高抗化学作用能力,如防腐、防酸蚀和抑制碱活性骨料(见混凝土骨料)反应的材料等。⑦提高抗生物作用,如杀菌剂、杀虫剂、防霉剂等。许多外加剂是多功能的,也有由几种材料制成的复合剂。

水电站工程常用的外加剂 主要有减水剂、引气剂、缓凝剂、早强剂、速凝剂、防冻剂及膨胀剂等。

(1) 减水剂。属表面活性剂,它能使水泥颗粒分散,释放水泥颗粒间多余的水分,掺入混凝土后在保持原有工作度的条件下,能显著减少用水量,从而降低水灰比,使混凝土强度提高。如果保持强度不变,就可节约水泥用量。所以在大体积混凝土中使用效益最高。减水剂有普通型、缓凝型和早强型等不同种类。水工混凝土大量应用的是普通型。在普通型中又以木质素为最常用,它是从纸浆废液中提取的各种木质素衍生物制成的。其次是缓凝型,水工混凝土上用得较多的是糖蜜,它是制糖工业的残液。

(2) 引气剂(加气剂)。一般属阴离子表面活性剂,掺有引气剂的混凝土在搅拌时能引入大量均匀分布的微小气泡,从而提高混凝土工作度。微小气泡可以阻止固体颗粒沉降和水分上升,使泌水性减少。这些微小气孔还能使混凝土抗冻性大为提高,但含气量增大常使混凝土抗压强度降低,因此有些国家对掺引气剂

混凝土的含气量作出规定,见表。

(3) 缓凝剂。能延缓水泥水化速度和凝结时间但对后期强度无不良影响的外加剂,常用的有柠檬酸、糖蜜、磷酸二氢钠等。大体积混凝土使用缓凝剂,延长了初凝时间,降低了混凝土仓面浇筑强度,放慢了水泥发热,有利于混凝土早期散热并可少量减低最高温升。缓凝剂掺量要严格控制,以免影响混凝土强度和增加泌水。

(4) 早强剂。能缩短水泥凝结时间,提高早期强度而对后期强度无损的外加剂。分无机物与有机物两类。常用的无机物如氯化物系和硫酸盐系。常用的有机物如三乙醇胺等。还有无机与有机的复合剂。早强剂适用于混凝土冬季负温施工或预制件生产。氯盐对钢筋有锈蚀性,须限制掺量,也可与阻锈剂如亚硝酸钠(NaNO_2)等一起使用。

引气剂混凝土含气量标准

国别	标 准	含气量 (%)
中国	水工混凝土外加剂技术标准 (SD108-83)	$R+ (3\sim4)$
中国	城乡建设混凝土减水剂技术标准	$3\sim5.5$
英国	BS5075-82	$\geq 4, \leq 6$
美国	ASTM、C-494	$3.5\sim7$
美国	ASTM、C-260	$R+ (3\pm0.5)$
日本	JISA 6204	N 时 $\geq R+2$
法国	NFP 18-103	M 时 $\leq R+4$

注: 1. R 为基准混凝土的含气量值,%;
2. N 为推荐标准掺量的含气量值;
3. M 为最大掺量的含气量值。

(5) 速凝剂。对水泥有强力促凝作用并提高早期强度的外加剂,如水玻璃、石膏、硫酸钠等,它适用于喷射混凝土和喷射水泥砂浆。掺速凝剂后,水泥初凝一般只要几分钟时间,所以拌制混凝土或砂浆时,必须随用随配。在安装工程中常用速凝剂固定小型埋件,其效果很好。

(6) 防冻剂。能降低水泥浆液冰点的外加剂。它使流态混凝土和水泥砂浆在一定负温下不冻结,能保持工作度并维持水泥水化反应,在一定时间内达到预期强度,避免混凝土和水泥砂浆早期遭受冻害。

(7) 膨胀剂。能使混凝土体积少量膨胀的外加剂,如石膏、铝粉、氧化镁等。它常用在填充部位、埋件部位、构件接头部位的混凝土以及补强工程中。

外加剂的发展简史 外加剂是从加气剂和减水剂的发现和研究开始的。1934年美国在研究公路路面混凝土的开裂和剥落现象中,发现在硅酸盐水泥中掺入树脂和油类,能改善混凝土性能,从而研制成加气剂,1942年美国俄亥俄州制定了加气混凝土规范,随后

Wan 万

美国材料试验学会 (American Society for Testing Materials, ASTM) 提出了加气剂标准。30 年代在混凝土里掺入亚硫酸纸浆废液作为减水剂起到了良好效果, 40 年代逐步研制成木质素系减水剂。自 50 年代以来许多国家开展了各类外加剂的研究生产, 取得了飞跃进展, 制定出专门规范, 生产并供应各种专利商品。近年来, 认为外加剂是配制混凝土中除水泥、骨料和水以外的另一种必要材料。

(章景安)

Wan'an Shuidianzhan

万安水电站 (Wan'an Hydropower Station)

位于赣江中游万安县境内, 上游距赣州 90 km, 下游距南昌 320 km, 以发电为主, 兼有防洪、航运、灌溉、养鱼等综合效益。装机容量 500 MW, 保证出力 60.4 MW, 年发电量 15.16 亿 kW·h, 以 220 kV 和 110 kV 电压供电给江西省电力系统。河床部分主坝为混凝土重力坝, 最大坝高 58 m。右岸阶地部分主坝为粘土心墙砂壳坝, 高 25 m。工程于 1981 年开工, 1990 年第一台机组发电, 1993 年完工。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 3.69 万 km², 多年平均流量为 947 m³/s, 多年平均年径流量 299 亿 m³。多年平均年输沙量: 悬移质 750 万 t, 推移质 200 万 t。为不完全年调节水库。正常蓄水位 100 m, 相应库容 17.16 亿 m³。死水位 90 m, 调节库容 10.19 亿 m³。挡水建筑物按千年一遇洪水设计, 万年一遇洪水校核。设计洪水流量 27800 m³/s, 相应水位为 100 m。校核洪水流量 33900 m³/s, 相应水位为 100.7 m, 相应库容 17.6 亿 m³。可能最大洪水流量 37700 m³/s, 相应水位为 103.6 m, 相应总库容 22.16 亿 m³。电站设计水头 22.0 m, 最大水头 32.3 m, 最小水头 12.8 m。

枢纽布置 坝区地震基本烈度 6 度。坝址主要岩层为侏罗系灰绿色中细粒石英砂岩, 岩层走向与坝轴线基本平行, 倾向下游, 倾角 20°。河床基岩埋藏较浅, 风化不深, 有 2 条规模较大断层。坝址小断层较多。

枢纽由河床溢流坝、非溢流坝、发电厂房、船闸、土坝、副厂房等建筑物组成, 见图。

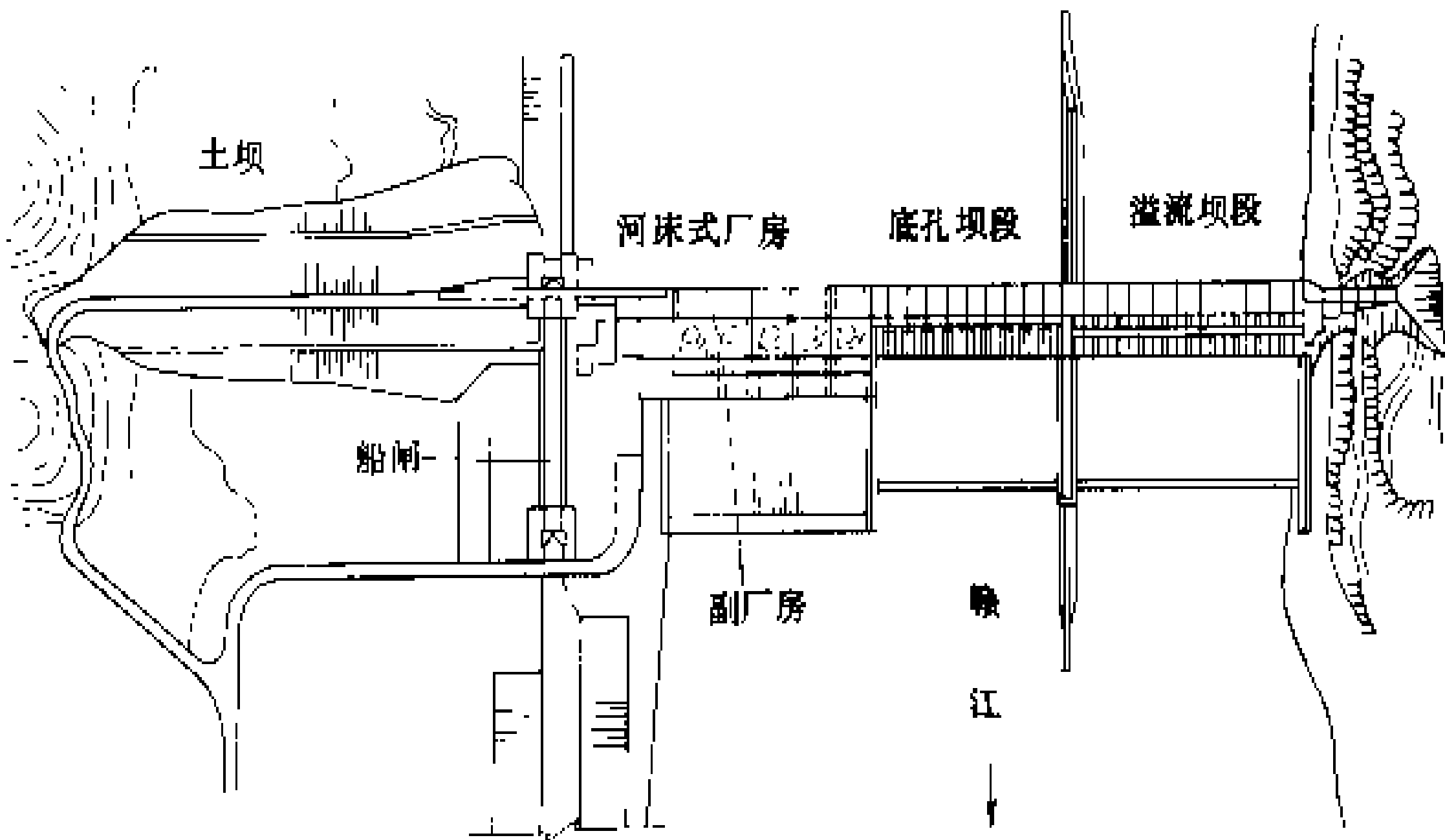
自左岸混凝土非溢流坝段至右岸土坝, 挡水前沿全长 1104 m。混凝土重力坝坝顶高程 104.0 m。溢流坝段布置有: 表孔 9 孔, 尺寸为 14 m×16 m (宽×

高), 堰顶高程 84.0 m; 底孔 10 孔, 尺寸为 7 m×9 m (宽×高), 孔底高程 68.0 m。均采用底流消能。初期运用, 要求库水位 92.0 m 时宣泄五十年一遇洪水 17900 m³/s。

河床式厂房长 197 m, 宽 27 m, 高 68.5 m。内装 5 台单机容量为 100 MW 的轴流式水轮发电机组。机组间距 30.4 m, 安装场长 45 m。水轮机转轮直径 8.5 m, 额定转速 76.9 r/min。送电电压为 220 kV 及 110 kV。高压配电装置采用气体绝缘金属封闭电器, 布置在主厂房下游侧副厂房顶部。

单级船闸, 布置在右岸, 设计吨级为 2 艘 500 t 驳船队。闸室有效尺寸为 175 m×14 m×2.5 m (长×宽×水深), 最大水头 32.3 m。在船闸右侧台地预留二期船闸位置。

综合效益 除发电外, 在防洪方面, 当下游遭遇三十至五十年一遇洪水时, 吉安最高洪水位较建库前可降低 0.4~1.3 m, 南昌地区可降低 0.2~0.3 m, 保护赣抚平原农田 200 万亩。在航运方面, 上游淹没万安至赣州的险滩, 使库区 90 km 航道得到改善, 枯水期还可增加下游航深 0.2 m。



万安水电站枢纽平面布置图

工程施工 主要工程量为: 土石方明挖 355 万 m³, 混凝土浇筑 158 万 m³, 钢筋及钢材 32600 t, 帷幕灌浆 19598 m, 固结灌浆 26880 m, 混凝土防渗墙 8642 m²。对外交通以公路为主。采用分期导流方式。

设计单位和施工单位 长江水利委员会设计, 武警部队水电二总队施工。

(侯建功)

Wanjiazhai Shuili Shunlu

万家寨水利枢纽 (Wanjiazhai Hydroproject)

位于黄河北干流托克托至龙口河段峡谷内, 左岸隶属山西省偏关县, 右岸为内蒙古准格尔旗。

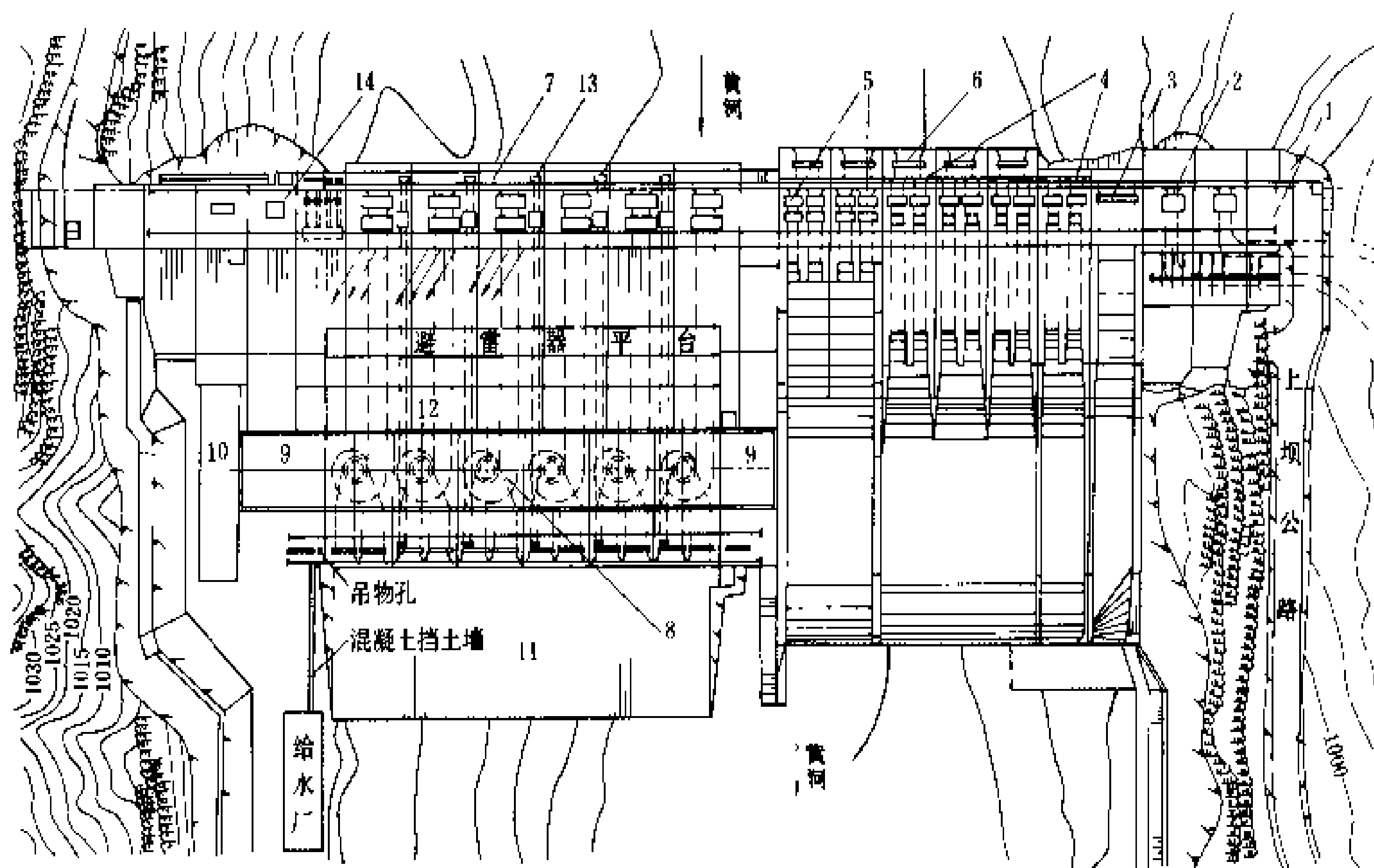
枢纽是黄河中游规划开发的 8 个梯级中的第一个梯级,也是引黄入晋工程的起点。枢纽的主要任务是供水和发电调峰,兼有防洪和防凌效益。电站装机容量 1080 MW,年发电量 27.5 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,以 220 kV 或 500 kV 电压向山西和内蒙古供电。主坝为混凝土重力坝,最大坝高 90 m。工程于 1993 年开始施工准备工作,计划于 1994 年主体工程开工,1998 年底第一台机组发电并具备供水条件,2000 年竣工。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 39.5 万 km^2 。多年平均年径流量 196 亿 m^3 。千年一遇设计洪水

流量 16500 m^3/s ,相应库水位 974.99 m。万年一遇校核洪水流量 21200 m^3/s ,相应库水位 979.10 m。水库最高蓄水位 980 m,正常蓄水位 977 m。采用“蓄清排浑”运行方式,排沙期运行水位 952~957 m,冲刷水位 948 m。水库总库容 8.96 亿 m^3 ,调节库容 4.45 亿 m^3 。电站最大水头 81.5 m,最小水头 51.3 m,设计水头 63.1 m。

枢纽布置 由混凝土重力坝、坝体泄洪设施、主副厂房、引黄取水口等建筑物所组成,见图。

大坝为半整体式混凝土重力坝,坝顶高程 982 m,



万家寨水利枢纽平面布置图

1—左岸非溢流坝；2—引黄取水口；3—溢流表孔；4—泄洪底孔；5—泄洪中孔；6—导流底孔；7—电站坝段；8—电站主厂房；9—安装场；10—副厂房；11—尾水渠；12—气体绝缘金属封闭电器；13—排沙孔；14—右岸非溢流坝

坝顶长 438 m,最大坝高 90 m。坝体有 8 个泄流底孔,孔口尺寸为 4 m×6 m,进口底坎高程 915.0 m,最大单宽流量 76 $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$;4 个中孔,孔口尺寸为 4 m×8 m,进口底坎高程 946.0 m,最大单宽流量 70 $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$;1 个 14 m×10 m 的表孔,进口底坎高程 970.0 m,最大单宽流量 45 $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。泄洪设施的泄流能力,在设计情况下为 7899 m^3/s ;在校核情况下为 8326 m^3/s 。

水电站进水口高程 932.0 m,钢管直径 7.5 m。为了减轻有害粒径泥沙过机和避免进水口淤堵,在每 2 个进水口下设 1 排沙孔,共 5 孔。排沙孔进口底坎高程 912.0 m,孔径 2.7 m。发电厂房布置在坝后,内装 6 台单机容量 180 MW 的混流式水轮发电机组。主厂房长 196.5 m(包括两个安装场,分别长 31.5 m 和 21 m)。两机组间中心距 24 m。水轮机安装高程 895.0 m。厂房上部宽 27 m,下部宽 43.25 m,总高 57.7 m。副

厂房长 63.5 m,宽 15 m,与主厂房呈“T”形布置。开关站采用气体绝缘金属封闭电器(GIS),布置在厂坝之间。混流式水轮机,转轮直径 5.8 m,额定转速 100 r/min,额定出力 183.7 MW,最大出力 204.1 MW,额定工况点效率不低于 91.7%。发电机额定功率 180 MW,额定功率因数 0.9,额定电压 15.75 kV。

左岸非溢流坝段上,布置有 2 个引黄取水口,向晋蒙能源基地供水。采用分层取水方式,取水库上层清水。取水闸门为下沉式活动平面闸门,门顶溢流,闸门可随水位的涨落而升降。取水口坝内孔径为 4 m。库水位 957 m 时,单孔引水流量为 24 m^3/s 。

主要工程量和工程施工 主要工程量为:土石方开挖和回填 132.24 万 m^3 ,混凝土和钢筋混凝土 184.55 万 m^3 ,钢筋和钢材 3.57 万 t,帷幕灌浆 12.78 km,固结灌浆 42.18 km,排水孔 13.26 km。

施工采用分期导流方案。第一期先做左岸围堰,基



坑范围为1~11号坝段,河床缩窄后的过水宽度为100~140 m。第二期围右岸基坑,施工12~22号坝段和坝后厂房,利用一期施工形成的5个9.5 m×9 m的导流底孔及宽38 m的缺口导流。一、二期上下游横向围堰均为土石围堰。一、二期渡汛纵向围堰为碾压混凝土围堰。导流标准为二十年一遇洪水,设计流量8350 m³/s。

设计和施工单位 天津勘测设计院设计,万家寨工程建设管理局负责建设。

(王 琪)

weiyān

围堰 (cofferdam) 在河湖等水域修建建筑物,为创造施工条件,用以围护施工场地的临时挡水建筑物。水工建筑物施工有不同的施工导流方式。当用断流围堰导流时,需用围堰将全部河床拦断。当用分期围堰导流时,则用围堰先后围住河床的不同部分。这时不仅要有基本垂直于水流流向的横向围堰,还要有顺水流方向的纵向围堰。要求围堰挡水的时段也因导流方式而不同,有的要求按全年考虑,洪水期也要求围堰挡水;有的只要求围堰在一定的枯水时段挡水,洪水期允许从围堰上过水。设计允许过水的围堰称过水围堰。

对围堰的基本要求一般为:①在规定的标准情况下,结构稳定,满足防渗、抗冲和强度的要求。②结构简单,施工方便,尽量利用当地材料及开挖渣料。③地基易于处理,堰体便于与岸坡或已有建筑物连接。④便于拆除。⑤在平面布置上要考虑基坑施工的需要,并力求使水流平顺。⑥具有良好的技术经济指标。有的情况下,围堰可与主体工程结合,构成主体工程的组成部分,则需满足对永久建筑物的要求。例如,土石围堰有时作为土石坝体的一部分;混凝土纵向围堰常与永久建筑物的隔墙、导墙结合。

围堰可以利用多种材料修建。常用的主要材料有土石、草料、混凝土、木材、钢板桩等。按所采用的材料,相应称为土石围堰、草上围堰、混凝土围堰、木笼围堰、钢板桩围堰等。

土石围堰 用土料、砂砾料或石渣修建的围堰,能充分利用当地材料,对地基的适应性强,构造简单,施工方便,必要时也便于加高培厚。按堰体采用材料的不同,又可分为①主要用土料填筑或水力冲填而成的土围堰。②主要用石料填筑的堆石围堰。③土料和石料均占相当比例的土石混合围堰。除均质土围堰采用单一土料外,其他各种围堰的堰体均设有心墙或斜墙防渗体。防渗体可采用满足防渗要求的土料,如砂壤土、风化料或砾质土料;也可采用刚性材料,如混凝土、钢板

桩、木板等。在水中抛填施工的土石围堰,堰体和地基可同时采用混凝土防渗墙防渗。葛洲坝水利枢纽工程的大江围堰,堰体高度一般在40 m左右,最大高度为50 m,填筑量274万m³,60%是在深10~18 m的水中抛填施工,除截流戗堤和上游堆石体外,均用砂卵石料。堰体防渗采用两道混凝土防渗墙,伸入基岩。土石围堰的地基覆盖层防渗处理方式应力求施工简单、造价低、工期短,可采用齿槽截水墙、铺盖、混凝土防渗墙等。

草土围堰 用稻草、麦草等草料和土料修建的围堰,可就地取材,施工简便,具有一定的抗冲、防渗能力,适应地基变形能力强,可在流水中修建。利用草土埝工于黄河堵口工程,是中国一种传统的河工技术。20世纪50年代以后,将这种传统的施工方法应用于青铜峡、盐锅峡、八盘峡等水利水电工程,修建草土围堰。它是用草捆、散草、土料,一层层铺草、压土,从岸边向水中进占,形成围堰。草土围堰一般适用于水深不超过8 m,流速不超过3.5 m/s的情况下。草料易于腐烂,因此使用期限不宜太长。

混凝土围堰 用混凝土修建的围堰,堰体断面较小,抗渗抗冲性能好,堰顶可以溢流,但对地基条件要求较高,宜用于岩基。这种围堰既可用作横向围堰,也常用作纵向围堰。其本身施工时,需先修筑小的土石围堰。混凝土围堰的主要型式有重力式和拱形两种。采用分期围堰导流施工的工程,常用重力式混凝土围堰作为纵向围堰,两侧均可挡水,两期工程可以兼用,并可与主体工程结合,作为永久建筑物的隔墙、导墙。当堰址河谷狭窄且地基和两岸地质条件良好时,可用混凝土拱形围堰。拱形围堰比重力式围堰断面小,可节省混凝土量,能适应较大的上下游水位差,适于作过水围堰。采用碾压混凝土修建围堰比用常规混凝土可以降低造价,缩短工期。隔河岩水电站工程的上游围堰为混凝土拱形过水围堰,最大高度42 m,混凝土总方量12.67万m³,其中碾压混凝土为10万m³,施工时间只有2个月。

木笼围堰 用圆木或方木纵横叠合,用螺栓连接成框格结构,内部填石形成的围堰,能承受较高的水头,抗冲力强,断面较小,顶部浇筑混凝土盖板后,可用作过水围堰。木笼围堰的迎水面用双层木板夹油毡形成防渗面板,面板底部与基岩的接合处,浇筑封底混凝土,若为软基,一般需打板桩或灌浆。木笼常在岸边分节预制,浮运就位,再装石沉放。新安江水电站工程一期围堰,横向和纵向均采用木笼过水围堰,最大高度15.7 m。这种围堰耗用木材较多,制造、沉放、拆除均不方便,已少采用。

钢板桩围堰 用特制的钢板桩组成的围堰,抗冲

能力强,断面较窄,既可用于岩基,又适用于软基,并可作过水围堰。钢板桩回收率高,可重复使用。钢板桩互相连接,可布置成单排、双排或格形体,以格形体用得最多。格型体围堰又可组成圆筒形、扇形或花瓣形等不同形式,格体内填以砂、砂卵石或石渣等。钢板桩围堰最高挡水水头小于 30 m,一般在 20 m 以下。这种围堰需用大量钢材,对施工机械化的要求较高,应用受到限制。

(王庭济)

weimu

帷幕 (curtain) 沿坝基及其两岸延伸部分的地下连续防渗幕体。它是常用的坝基防渗措施之一。帷幕与挡水建筑物的防渗结构的连接要可靠,共同形成地上、地下连续的防渗体系。用钻孔灌水泥浆或各种化学浆液形成的帷幕称灌浆帷幕(见帷幕灌浆和化学灌浆);在砂砾石坝基中用混凝土防渗墙形成的帷幕称垂直防渗墙帷幕(见软基处理)。在防渗墙下进行灌浆的帷幕称组合式帷幕。帷幕的作用主要有:①减少坝基和绕坝渗漏量。②防止断层裂隙中的充填物及抗水性能差的地层产生管涌。③在帷幕和排水的共同作用下,使幕后坝基及两岸边岸的渗透压力降低至允许值,防止渗透压力对坝体、坝基及两岸边坡稳定产生不利影响。④灌浆帷幕兼有对坝基表层的接触灌浆和固结灌浆的作用。

帷幕的深度和伸入两岸的范围由坝高、地质条件及防渗要求等确定。帷幕深度一般伸入相对隔水层;伸入两岸的范围一般略超过正常蓄水位与天然地下水位相接处。帷幕范围也可根据地质条件及防渗要求,经计算或试验确定。通常帷幕深度多为 0.5~1 倍坝高。相对隔水层考虑坝高、坝型、地质条件等因素,以钻孔压水试验单位吸水率 $\omega < 0.01 \sim 0.05 \text{ l}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m})$ (或 1~5 吕荣)为标准。岩溶地区的帷幕深度及伸入两岸的范围,应根据岩溶及渗漏通道的分布情况和防渗要求确定。伸入相对隔水层的帷幕称封闭式帷幕。未伸入相对隔水层的帷幕称悬挂式帷幕。

帷幕灌浆的钻孔方向有垂直的和倾斜的。帷幕钻孔的排数有单排的和多排的。倾斜帷幕,在一定地质条件下,能穿过较多的岩体裂隙和层面,有时比垂直帷幕的防渗效果好,但施工较为复杂。单排孔帷幕适用于透水弱、岩性良好的坝基;多排孔帷幕比单排孔帷幕更能形成可靠、连续的防渗幕体。

(董育坚)

weimu guanjiang

帷幕灌浆 (curtain grouting) 在岩石或砂

砾石地基中为建造防渗帷幕进行的灌浆。

帷幕可由单排或 2~3 排灌浆孔组成。当岩石完整、透水性小时,可采用单排;当岩石破碎、裂隙发育、透水性大、地质条件复杂时,则多采用 2~3 排。排距、孔距一般多通过工地灌浆试验后确定。

单排帷幕的灌浆孔常分为三个次序,依序施工。双排孔帷幕的施工次序为先灌下游排孔,后灌上游排孔。三排孔帷幕则先灌下游排孔,再灌上游排孔,最后灌中间排孔。

帷幕灌浆的灌浆孔较深,均采用分段灌浆法,并且常采用循环灌浆的方式。

钻孔采用回转式钻机,根据岩石的硬度和施工技术要求,选用金刚石钻进,硬质合金钻进,或钻粒钻进。钻孔的倾斜度和方位角应符合设计要求。

帷幕灌浆采用水泥浆,由稀浆开始,逐级变浓。水泥浆的水灰比通常分为 8、5、3、2、1.5、1、0.8、0.6 和 0.5 (重量比) 9 个比级。当吸浆量大时,灌浆也可从较浓的水灰比开始。灌浆结束标准为:在规定的压力下,当吸浆量小于 0.4 L/min,再延续灌注 30~60 min 结束。采用孔口封闭灌浆法时,延续灌注时间不少于 2 h。另外,有些国家主张采用水灰体积比小于 5 的较浓浆进行灌注;有些国家建议采用水泥基质稳定性浆液(即在低水灰比的水泥浆中加入少量的膨润土,制成析水率小的稳定性浆液)进行灌注。

灌浆设计多遵循渗入性灌浆理论,以此为基础确定灌浆压力。近期也有一种新的张裂式灌浆理论,主张采用高压,将岩石中的裂隙撑大张开,以提高岩石的可灌性,但在大坝岩石基础帷幕灌浆设计中很少应用。

对于有涌水压力和涌水量的灌浆孔,在灌浆前需先测记涌水压力和涌水量,并应根据具体情况,制定特殊的灌浆工艺和采用必要的技术措施。

帷幕灌浆结束后,应钻检查孔,并做压水试验,以检验帷幕的防渗性能,如不能满足设计要求,则需增加灌浆孔,补作灌浆,直至达到设计要求时止。

(孙 钊)

weishuiguan

尾水管 (draft tube) 回收转轮出口水流能量,并将水流排至下游的部件。尾水管是水轮机过流通道的一部分,有直锥形和弯曲形两种。

直锥形尾水管 见图 1。一般整锥角 $\theta = 10^\circ \sim 14^\circ$, 出口流速 $v_2 = 1.5 \sim 3.5 \text{ m/s}$, $L/D_1 = 3 \sim 4$ 。管内水流均匀,阻力小,能量回收系数高,结构简单,易于制造,但挖深太大,用于小型、卧式水轮机和贯流式水轮机上。

弯曲形尾水管 水力性能不如直锥形,但挖深较

小,广泛应用于大中型反击式水轮机。从底环平面至尾水管底板间的高度 h 是影响尾水管性能的关键尺寸,一般通过模型试验确定。尾水管由进口锥管 A、肘管 B 及出口扩散管 C 三部分组成,见图 2。进口锥管为简单的直圆锥形,扩散整锥角一般为 $14^\circ \sim 20^\circ$,出口扩散管为矩形或扁圆形断面扩散管。肘管为连接进口锥管和出口扩散管的过渡段,当出口扩散管的宽度 B_1 大于 $10 \sim 12 \text{ m}$,因结构需要在管内加支墩。由于蜗壳的偏心,尾水管中心线在平面上偏转一个角度,以减少机组段宽度。另一种弯曲形尾水管只用于小型卧轴水轮机,它由等圆断面 90° 弯管和直圆锥形扩散管组成,结构简单,制造容易,但流态较差。

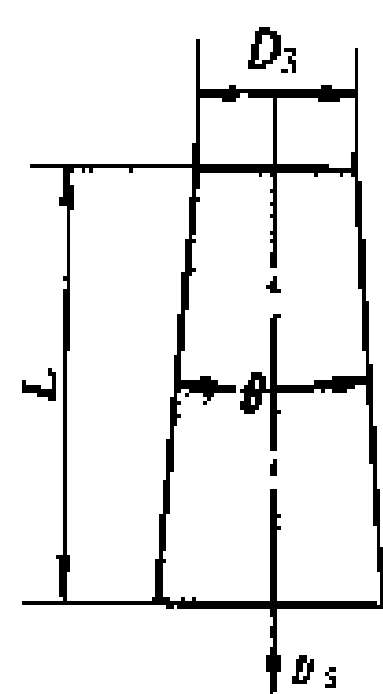


图 1 直锥形尾水管

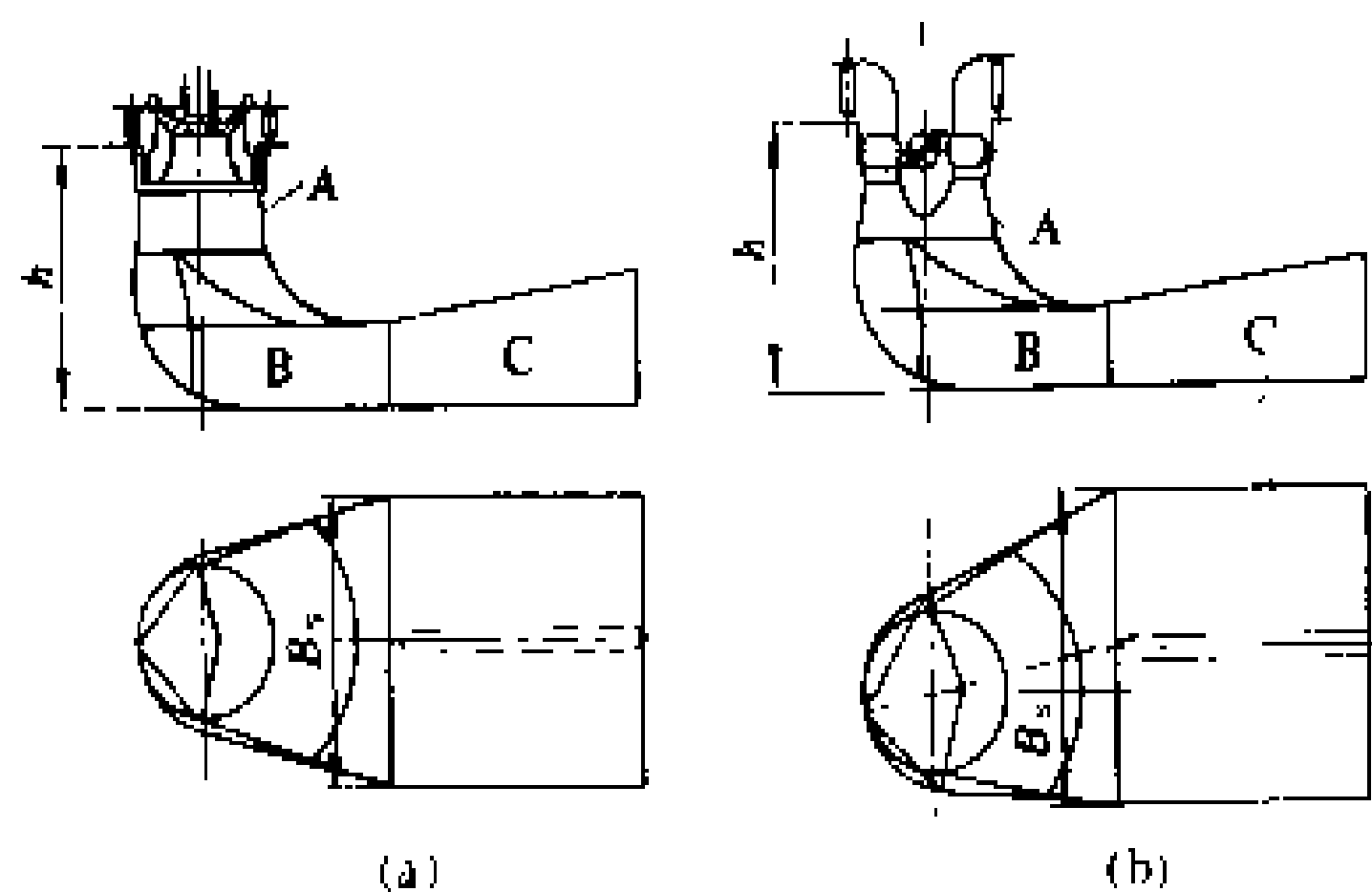


图 2 弯曲形尾水管

(a) 混流式水轮机弯曲形尾水管; (b) 轴流式水轮机弯曲形尾水管

尾水管一般用钢筋混凝土浇筑,进口锥管用钢板里衬保护,为防止水流对混凝土的冲刷,保护钢板一直延续到水流速度 6 m/s 左右的地方。有时为了免去立模、拆模工作,保证外形尺寸正确,整个肘管甚至出口扩散管都用钢板里衬。大型里衬在工厂成型,分段分瓣运到工地组焊。进口锥管上设有进入孔及验水阀,最低点设排水阀。当转轮需从下部拆出时,整个钢板制造的进口锥管是可拆的。

(吴次光)

weishuiqu

尾水渠 (tailwater channel) 将发电尾水从尾水管出口排至下游河道的渠道。尾水管出流尚有部分余能,有一定的冲刷能力,故尾水渠的起始段常用混凝土衬护。尾水渠由渐变段和正常渠段组成。尾水管出口处水深大,正常渠段水深与河道相似,两者中间设渐变段,其水深由深变浅,渠底形成反坡,一般反坡不宜陡于 $1:5$ 。尾水渠在平面布置上要求平顺,出流均

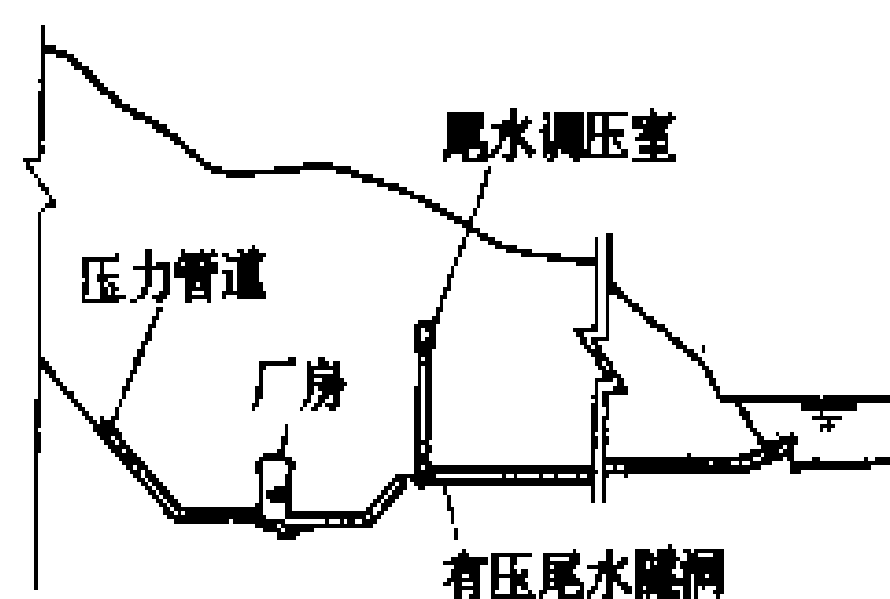
匀,不形成回流。当尾水渠与泄洪水流邻近时,为避免尾水波动影响机组稳定运行,常将泄洪水流与发电尾水用导流墙分开。尾水渠流速、纵坡、边坡坡度及衬砌等设计原则与引水明渠类似。

(刘维德 王树人)

weishui suidong

尾水隧洞 (tailwater tunnel) 将发电尾水从尾水管出口(或下游调压室出口)排至下游河道的隧洞。它分无压与有压两种。水流要防止明满流交替,以免产生气爆。尾水隧洞出口一般应设检修闸门。当几台机组合用一条尾水洞时,在尾水管出口处(或下游调压室出口)设有闸门。确定尾水隧洞的经济流速和衬砌种类的原则,见引水隧洞。

无压尾水隧洞 一般用于水位变幅不大的河道,可不设尾水调压室,需保证洞顶留有足够空间,在流量变化时,涌浪不致封塞洞顶。无压尾水隧洞横断面常做成圆拱直墙型。



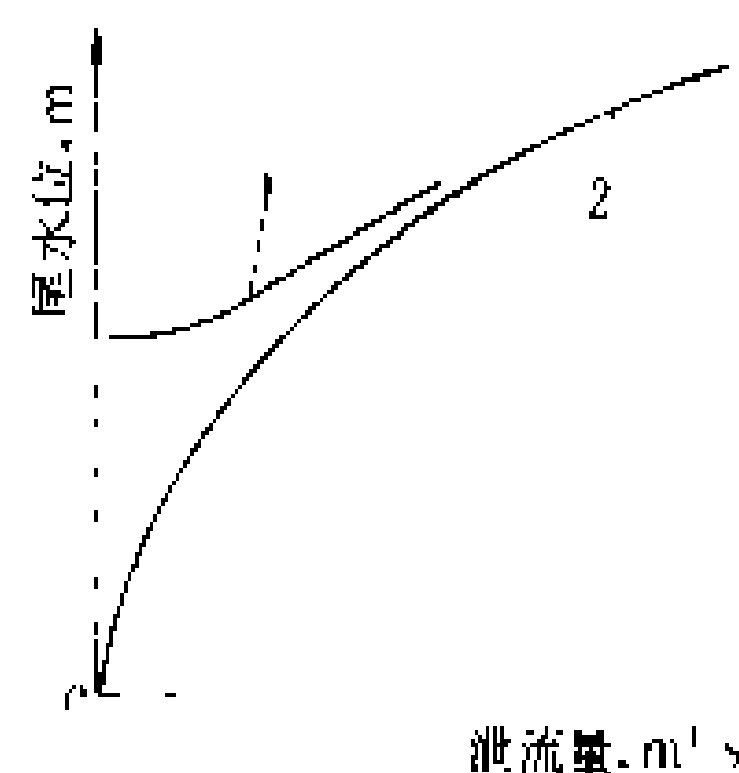
有压尾水隧洞示意图

有压尾水隧洞 常用于水位变幅较大的河道,当尾水隧洞较长时,需设尾水调压室,以减少水击压力(见图)。尾水隧洞内水压力不大,多采用圆拱直墙型及马蹄型横断面。

(刘维德 王树人)

weishuiwei

尾水位 (tailwater level) 水电站厂房尾水管出口处的河水位。尾水位是确定水电站工作水头的参数之一,在水电站下游无梯级电站、隘口或其他礁滩



尾水水位流量关系曲线示意图
1- 不受回水顶托时; 2- 受回水顶托时

等回水顶托的情况下,水电站的尾水位,决定于电站下泄流量及其自由水面的水位流量关系曲线;当存在上述回水顶托时,则应按回水的情况确定其尾水位。当电站下游有淤积现象发生时,电站尾水位应计

及淤积的影响。在电站施工时,应避免在厂房下游堆渣,引起电站尾水位抬高,而造成水电站能量和容量的损失。对于中、低水头水电站此问题尤其重要。

尾水位与泄流量关系曲线见图。

(伍宏中)

Weiyuan Shuidianzhan

渭源水电站 (Weiyuan Hydropower Station)

位于中朝界河鸭绿江的中游,中国吉林省集安县老虎哨村和朝鲜慈江道渭源郡渭源邑境内,其上游为云峰水电站,下游为水丰水电站。电站为中朝两国共同投资、共同所有,由朝方负责设计、施工和运行管理。电站总容量为390 MW,保证出力50 MW,多

边坡一般较稳定。坝址区地层由较完整的坚硬花岗岩组成,渗透性很微弱,单位吸水量一般小于0.01 l/min。河床砂砾石层厚度1~4 m。

枢纽由大坝、发电厂房、变电站和通航设施等建筑物所组成,见图。

重力坝坝顶高程171 m,长627 m,坝轴线采用曲线布置,比直线方案节省土石方开挖量约40万m³。连接两岸的为非溢流坝,中间部分为溢流坝。溢流坝设有18孔开敞式溢流孔口,溢流堰顶高程151 m,用弧形钢闸门控制,闸门尺寸为12 m×13 m。

坝后式厂房位于左岸朝鲜侧。其主要建筑物有:进水口、压力钢管、主厂房、尾水渠等。进水口为深水式,底部高程133 m,设有快速闸门和检修闸门。压力钢管进口处为7 m×7 m正方形断面,后渐变为圆管,直径6.34 m,长度32.75 m。采用单机单管布置,6根钢管向6台机输水。主厂房宽20 m,机组间距22 m,总长度163.5 m(包括安装场,长30 m)。厂内安装6台混流水轮发电机组,单机容量65 MW。尾水渠设有平面闸门,闸门尺寸为6 m×6.5 m。

地下变电所设在左岸山头内。主变压器室地面高程145 m,宽14 m,高12 m,长22.5 m。6台75 MV·A三相变压器分别设置于单独小间内。

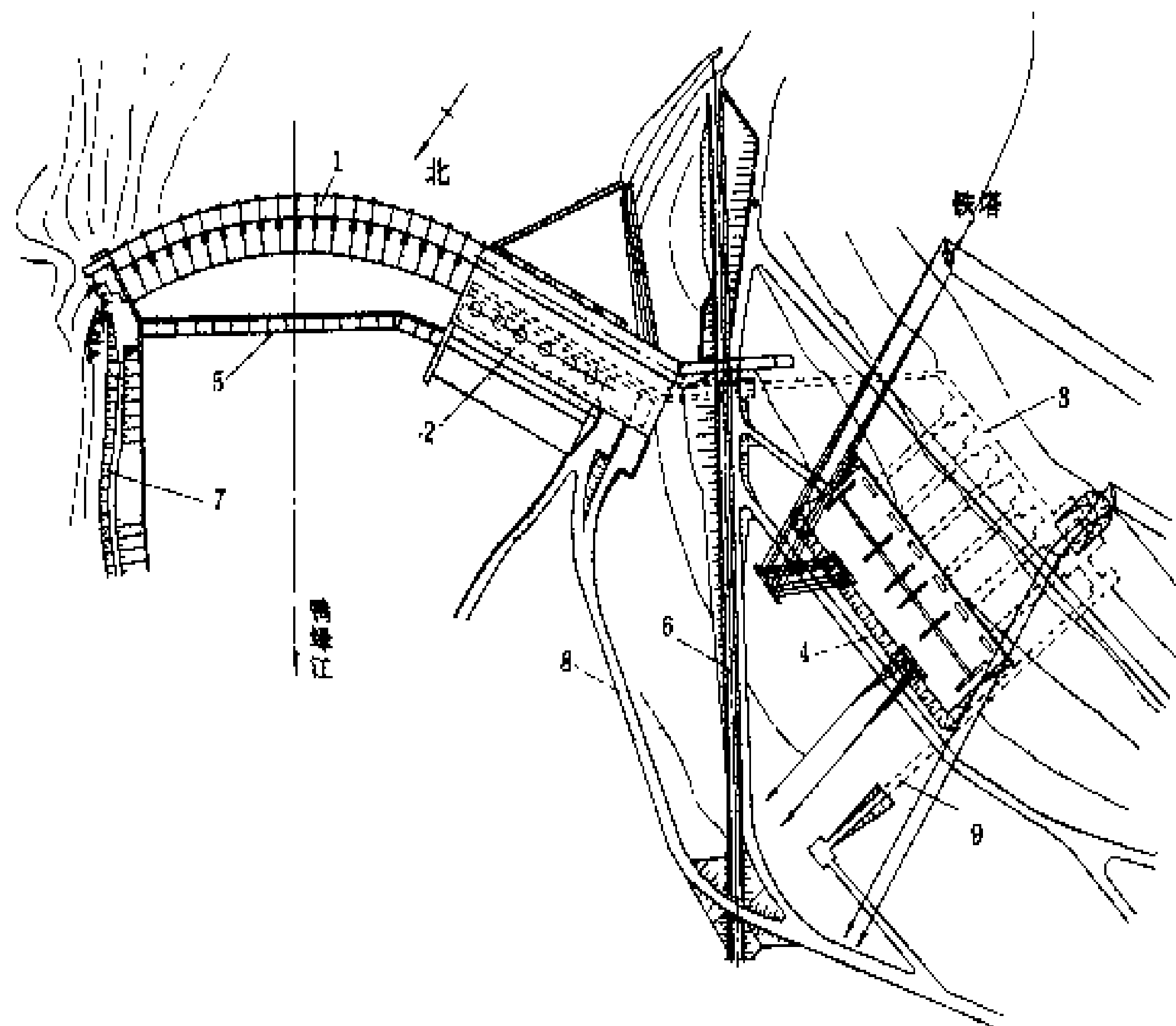
左岸设计布置有1条筏道,尚

未建。

左右岸各设有一个供工、农业用水的取水口,最大引用流量,左岸1.5 m³/s,右岸2 m³/s。

设计单位 朝鲜电力工业委员会平壤设计院。

(刘福基)



渭源水电站枢纽平面布置图

1—坝; 2—厂房; 3—主变压器室; 4—220 kV开关站; 5—消力坎; 6—筏道(尚未建); 7—右岸渠道; 8—进厂公路; 9—地下通道

年平均发电量12亿kW·h,年利用小时数为3000 h。安装50 Hz和60 Hz不同频率的机组各3台,分别向中朝两国供电。输电用220 kV和66 kV电压。主坝为混凝土重力坝,坝高55 m。工程于1979年开始施工准备,1980年正式开工,1987年10月10日第一台机组发电,1988年6台机组全部建成投产。

水文和水库特性 坝址以上流域面积为31602 km²。坝址多年平均流量为407 m³/s。设计洪水标准为五百年一遇,相应洪水流量30500 m³/s。校核洪水标准为五千年一遇,相应洪水流量为40200 m³/s。水库正常蓄水位为164 m,死水位为150 m,设计洪水位为167 m,校核洪水位为170 m。水库总库容为6.26亿m³。正常蓄水位高程的水库面积为39 km²。电站设计水头39 m,最大水头42 m,最小水头25 m。

枢纽布置 库区地层主要由坚硬的花岗岩和变质岩类组成,透水微弱。两岸基岩大部裸露,覆盖层不厚,

wenliu

紊流 (turbulent flow) 粘性流体质点互相掺混,各点的运动要素呈不规则脉动的流动状态,亦称湍流。O. 雷诺(O. Reynolds)最先通过管道水流试验揭示了紊流和层流是实际流体的两种基本运动形态,当雷诺数 $Re = \rho v d / \mu > 10^4$ 时,流体的流动形态一般呈紊流型,自然界的流体运动大多属此。

紊流分为两类:流场内存在流速梯度者为剪切紊流,不存在流速梯度者为各向同性紊流。工程技术领域常见的流动多为剪切紊流,它又按紊动产生条件再划

分为：自由紊流（如水射流），和近壁紊流（如边界层）。

紊流起因于外来扰动和流体的粘性。扰动通过粘性作用的传递，使流场内遍布尺度大小不同的各种旋涡，因而流场内某一点的流动要素都具有随机脉动的性质，但从统计学角度它们又都存在确定的统计平均值。紊流运动各流动要素的瞬时值可视为时均值和脉动值的叠加，即

$$\begin{aligned} \text{压强} \quad p &= \bar{p} + p' \\ \text{流速} \quad u &= \bar{u} + u' \end{aligned}$$

式中 \bar{p} 及 \bar{u} 为时均值； p' 及 u' 为脉动值。

紊流的紊动强度 T_u 用速度脉动值的方均根值 $\sqrt{u'^2}$ 除以速度时均值 \bar{u} 表示

$$T_u = \sqrt{u'^2} / \bar{u}$$

雷诺从纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes) 运动方程出发，进行平均化运算后而导出紊流运动的基本方程，亦称雷诺方程（张量形式）

$$\rho \frac{du_i}{dt} = \rho F_i + \frac{\partial}{\partial x_j} p_{ij}$$

式中 ρ 为流体密度； F_i 为单位质量力；最后一项是单位体积上应力张量 p_{ij} 的散度。

上列雷诺方程加上连续方程所组成的方程组不封闭，为此，近百年来的紊流研究发展了各种补充关系式，主要是关于紊动剪应力的半经验理论、关于各向同性紊流的统计理论、关于剪切紊流的随机理论。如：1887 年布辛涅斯克 (J. V. Boussinesq) 紊动粘性系数假说，1925 年普朗特 (L. Prandtl) 混合长度学说；1935 年泰勒 (G. I. Taylor) 脉动流速相关矩理论，其后，T. Von 卡门 (T. Von Karman)，A. H. 柯尔莫洛夫 (A. H. Колмогоров) 和中国周培源都在紊流统计理论方面有所建树；还有，依据随机理论对剪切紊流的相关函数和谱函数进行的分析研究等。

雷诺管流试验指出：在充分发展了的紊流中，阻力系数 (λ) 与流动雷诺数无关，只是边壁相对糙度 k_s/r (k_s 为糙高， r 为管道半径) 的函数，如

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = a \log \frac{r}{k_s} + b$$

通常采用 $a=2$ ， $b=1.74$ (见水流阻力)。这时，管道水流阻力损失与平均速度的二次方成正比。近壁时均速度分布，常用普朗特-卡门 (Prandtl-Karman) 给出的对数形式或勃朗休斯 (Blasius) 建议的指数形式表示。

参考书目

Hinze, J. O. Turbulence. McGraw-Hill, 1975

吴国仁，紊流力学，北京：人民教育出版社，1981

(时启燧)

涡流

(vortex motion) 流场中流体微团发生旋转的流动，亦称有涡（有旋）流动。涡流起因于流体固有的粘性和外来的扰动，其特征是流体微团间产生相对运动和相互掺混，从而将流体内的部分机械能转化为热能而耗散。

自然界常见的涡流现象很多，如：大气中的龙卷风，船只前进时船尾后面的涡列，桥墩下游的涡旋，液体容器出流孔附近的涡旋，河流瀑布，跌水下游的翻腾流态等。还有很多涡流现象，单凭肉眼是观察不到的，如流体运动中普遍存在着的紊流，其内部就充满着尺度不同的大小涡旋。涡流内部都存在着剪切变形并伴有能量消耗。

水电工程中研究涡流有着现实的意义：一方面可利用涡流消能，如水电站泄水建筑物过水时采用的水跃消能；另一方面则致力于减轻涡流的能量损失，如水力机械设计旨在使涡流减弱，以减少阻力，提高机械效率。

流体力学中以涡量（旋涡向量） Ω 或环量（环流量） Γ 来表示涡流

$$\Omega = 2(\vec{\omega}_x + \vec{\omega}_y + \vec{\omega}_z) = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} \quad (1)$$

$$\Gamma = \oint (u dx + v dy + w dz) \quad (2)$$

两者关系为

$$\Gamma = \int_V \Omega ds \quad (3)$$

式中 ω 表示流体微团的旋转角速度， ω_x ， ω_y ， ω_z 及 u ， v ， w 分别表示旋转角速度及线速度在直角坐标系 3 个方向的分量。

当 $\Omega \neq 0$ 时，为有涡流动； $\Omega = 0$ 为无涡流动（见势流）。

(时启燧)

蜗壳

(spiral case) 使水轮机进水形成一定环量并沿整个圆周均匀地输送给导水机构的部件。蜗壳回绕在导水机构四周，从进口开始断面逐渐缩小，形如蜗牛壳。断面变化规律一般采用等速度矩法 ($v_u r = \text{const}$) 或等速度法 ($v_u = \text{const}$)，也有两者相结合的。蜗壳分混凝土蜗壳和金属蜗壳两种。

混凝土蜗壳 用于水头小于 40m 电站的水轮机上，一般为“T”形断面，见图 1。“T”形断面的高、宽比 b/a 一般在 1.5~2.0 之间，包角在 135°~270°之间，常用 180°，必要时通过模型试验确定。蜗壳内侧



为座环,在蜗壳的适当位置设进人门,便于检查维修,在最低点设排水阀,以便检修时排空水。

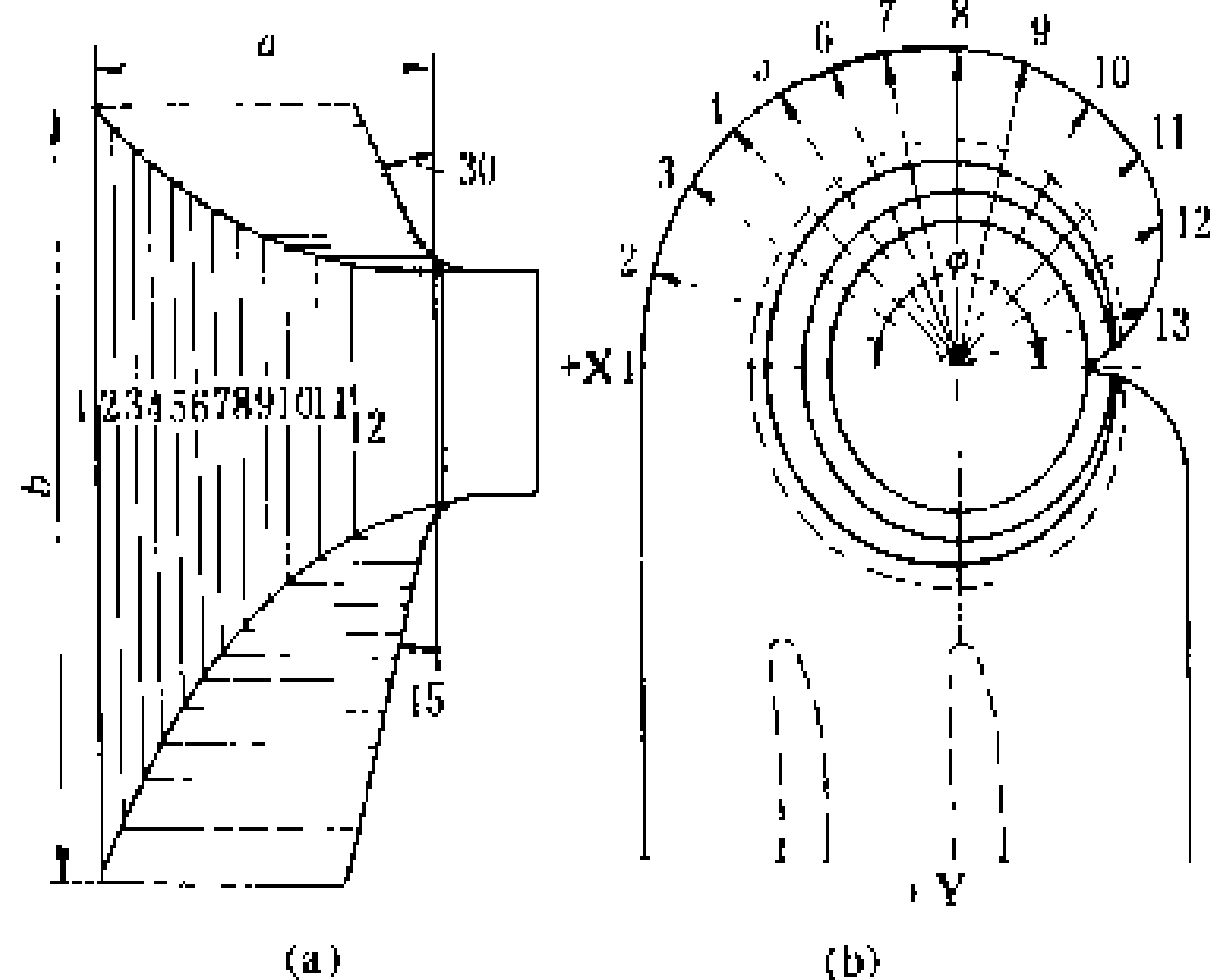


图1 包角 $\varphi=180^\circ$ ，“T”形断面混凝土蜗壳
(a) 蜗壳剖面图；(b) 蜗壳平面图

金属蜗壳 应用十分广泛,其断面为圆形,见图2。由于结构上的原因,接近尾部的几节采用椭圆形断面。包角一般为 $345^\circ\sim 360^\circ$,蜗壳内侧为座环,蜗壳和座环用蝶形边连接,其锥角为 55° 。近来采用无蝶形边的箱形结构,增加刚度,改善受力条件,便于组焊。水头较低的小型水轮机可用铸铁蜗壳,高水头水轮机采用钢板焊接或铸钢铸造,绝大多数焊接蜗壳考虑单独承受内水压力,有的考虑钢板与混凝土联合受力。钢板焊接蜗壳在工厂成形焊成整体或根据运输条件焊成数段运至工地焊接。蜗壳的最低点设排水管,适当的位置装有进人门。

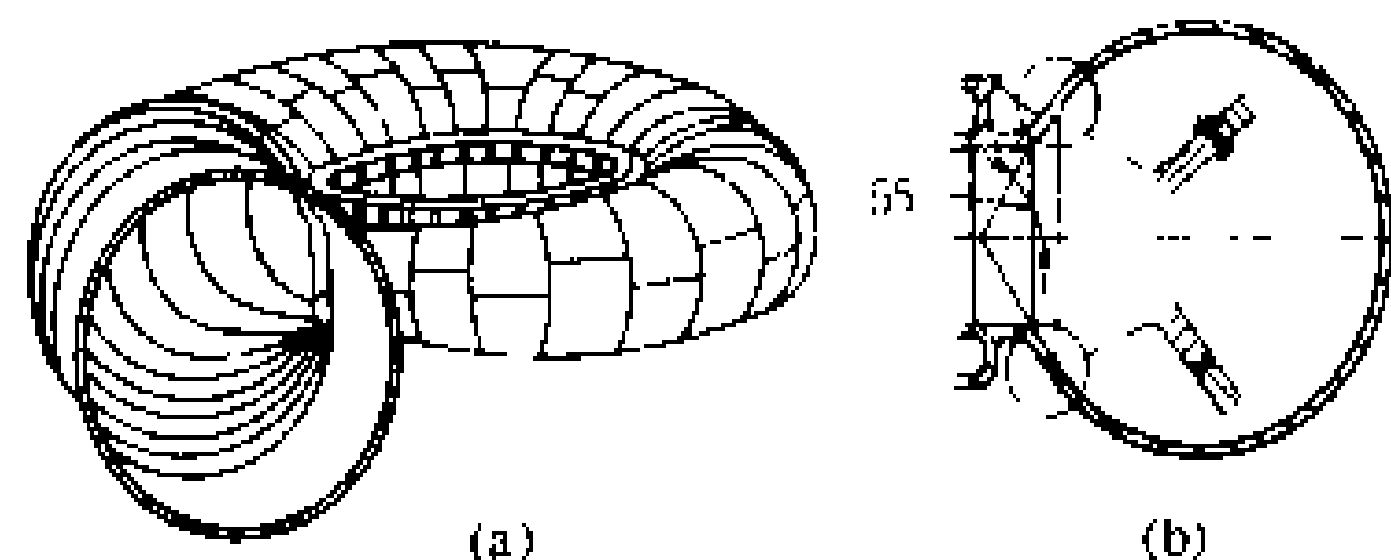


图2 金属焊接蜗壳
(a) 立体图；(b) 剖面图

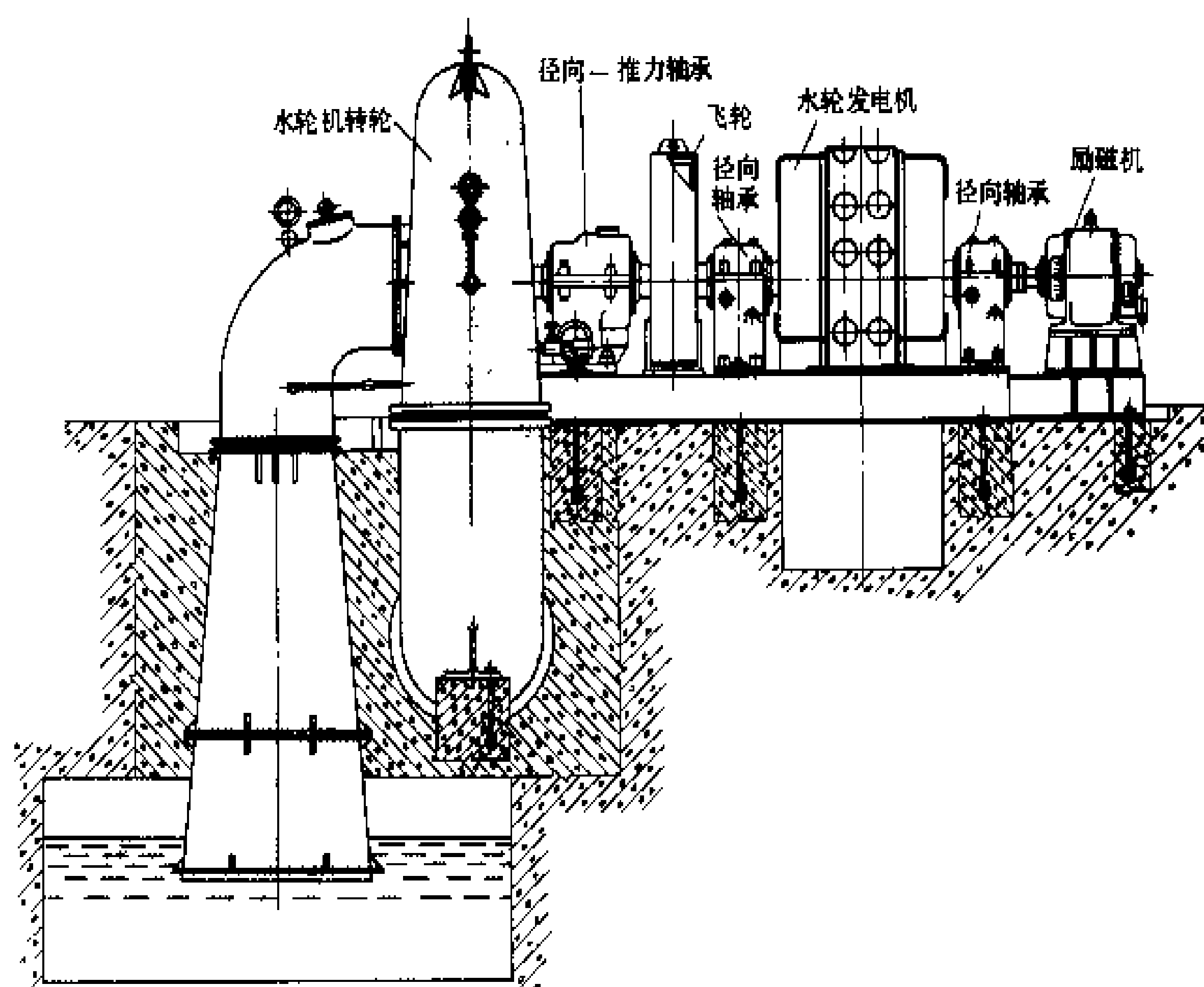
(吴次光)

woshi shuilun fadianji

卧式水轮发电机 (horizontal shaft hydro-generator)

转轴水平布置的水轮发电机。其特点是水轮机与水轮发电机布置在同一水平面上,因此占地面积较大。结构上要考虑转子自重引起的挠度,轴的刚度要求相应高些。卧式机组可降低厂房高度,节省开挖量。多用于中、小容量机组、贯流式机组、高转速机组(375 r/min以上),也用于个别大容量机组。

卧式水轮发电机的轴承承受转动部件的重量,推力轴承承受转动部分的轴向力,通常要设置两个或三个轴承。两轴承结构的机组轴向长度短,结构紧凑,安装调整方便。当轴承负荷较大时,则采用三轴承结构,见图示。轴系临界转速应大于机组飞逸转速的1.2倍。轴承型式多采用座式滑动轴承,对于大、中容量的贯流式机组采用具有推力轴承的复合式轴承。



卧式三轴承水轮发电机组外形图

小容量卧式水轮发电机定子多为整体结构。大、中容量卧式水轮发电机由于外形尺寸较大,为适应吊运及拆装工艺要求,定子常采用分瓣结构,即分成上、下两部分,合缝处用销钉定位并用螺栓紧固。

卧式水轮发电机的冷却方式常用的有:表面冷却式、通风冷却式、管道通风冷却式和循环冷却式。表面冷却式完全靠机壳表面散热,适用于容量较小的封闭式电机。通风冷却式适用于开启式电机,冷却介质为空气,空气进入电机内部吸收热量后又向周围散发,冷却效果较好。管道通风冷却方式是通过管道将冷却空气送入电机,吸收热量后又经管道排出,同样具有较好的



冷却效果。循环冷却式的冷却系统自成闭合回路循环，一次冷却介质吸收的热量通过闭合回路中的冷却器传递给二次冷却介质（一般为水），因此冷却效果较好。常用于大、中型卧式水轮发电机。

卧式水轮发电机一般用于中、小容量机组，仅在少数大型水电站或抽水蓄能电站采用。例如奥地利科鲁斯（Kops）水电站采用单机容量为 102 MV·A 的卧式机组；瑞士格里姆塞尔（Grimsel Ost）抽水蓄能电站采用单机容量为 100 MV·A 的卧式抽水蓄能机组；德国霍贝尔格威尔（Hornberg Wehr）抽水蓄能电站采用单机容量为 290 MV·A 的卧式抽水蓄能机组。中国以礼河水电站采用单机容量为 36 MW 的卧式水轮发电机。

（邱景安）

Wujiangdu Shuidianzhan

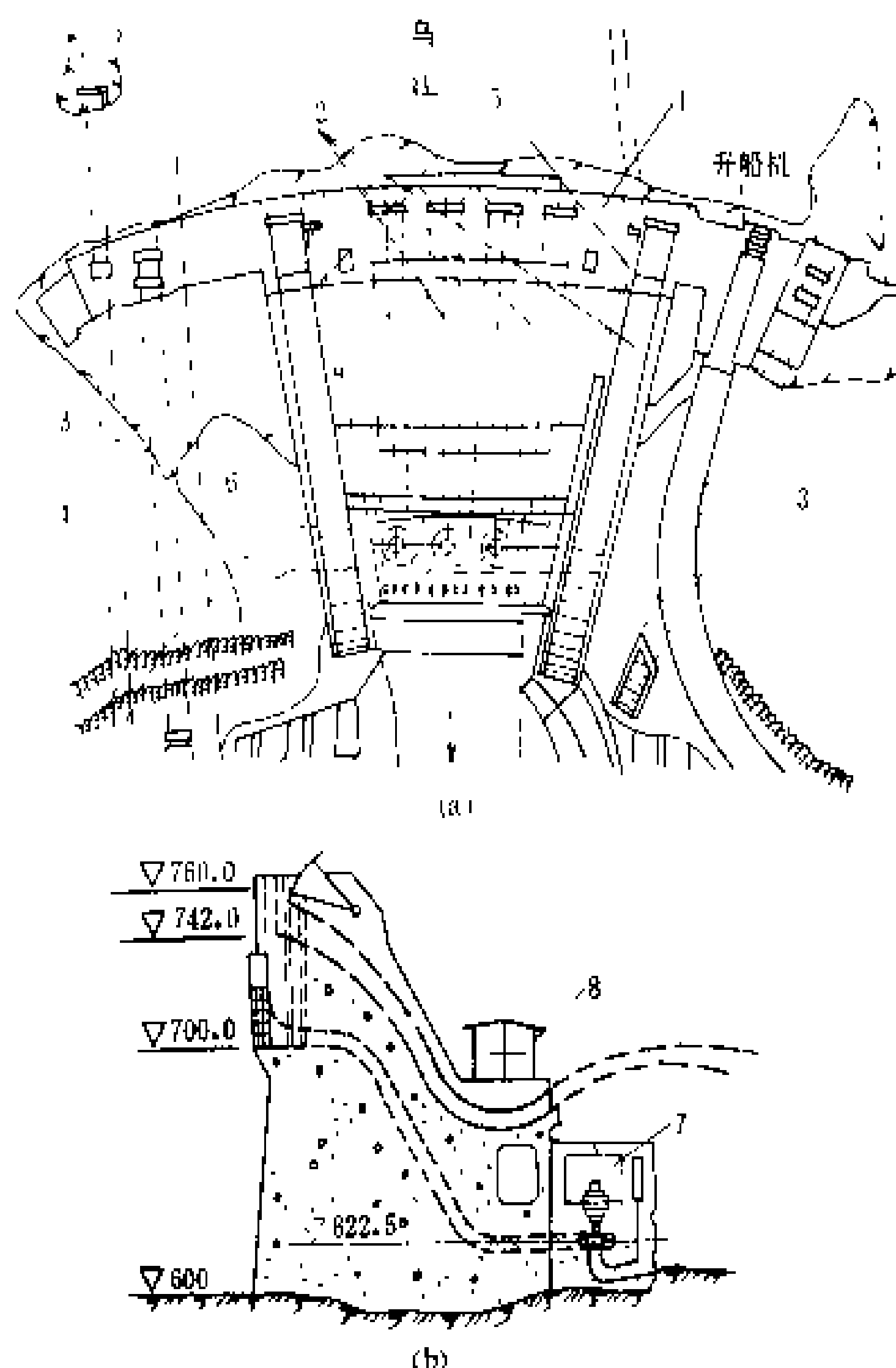
乌江渡水电站（Wujiangdu Hydropower Station）位于长江支流乌江中游，贵州省遵义市以南 55 km 处，是中国在喀斯特地区兴建的第一座大型工程。电站以发电为主，装机容量 630 MW，保证出力 202 MW，多年平均年发电量 33.4 亿 kW·h，以 220 kV 和 110 kV 电压向四川和贵州送电。大坝为混凝土拱型重力坝，最大坝高 165 m。工程 1974 年开工，1979 年第一台机组发电，1983 年竣工。（参见彩图插页第 8 页 10 图）

水文和水库特性 坝址以上流域面积 27790 km²，多年平均流量 502 m³/s，多年平均年径流量 158 亿 m³。主要工程建筑物按五百年一遇洪水设计，五千年一遇洪水校核。设计洪水流量 19200 m³/s，相应库水位 760.3 m。校核洪水流量 24400 m³/s，相应库水位 762.8 m。水库正常蓄水位 760 m，死水位 720 m。水库总库容 23 亿 m³，调节库容 13.5 亿 m³，死库容 7.9 亿 m³，防洪库容 1.6 亿 m³。为季调节水库。电站最大水头 134.2 m，设计水头 120 m，最小水头 94.2 m。

枢纽布置 在深窄峡谷中，布置混凝土拱形重力坝，坝后设有封闭厂房、主变压器、高压开关站和泄洪设施等建筑物，见图。采用多层重叠布置，充分利用汛期下游河床水垫较厚的特点，各个泄水建筑物出口远、近、高、低错开布置，使水舌落点沿河床纵向扩散，远离易被冲刷的页岩层。

大坝坝顶高程 765 m，顶部弧长 368 m。坝后主厂房为全封闭式厚壁框架结构，长 106 m。大坝溢流时水舌由坝上挑坎挑出，经厂房上空挑落至下游河床。厂内安装 3 台水轮发电机组，单机容量 210 MW。水轮机转轮直径 5.2 m，额定转速 150 r/min。发电机为半空冷型，额定电压 15.75 kV，额定功率因数

0.875。主变压器安装在主厂房上游的副厂房内，高压出线用电缆引出。220 kV 高压配电装置采用气体绝缘金属封闭电器，配电装置室布置在溢洪道挑坎侧墙上架设的桥上。



乌江渡水电站枢纽布置图

（a）平面布置；（b）坝体剖面

1—大坝；2—溢洪道；3—泄洪隧洞；4—放空洞；

5—泄洪中孔；6 导流洞；7—厂房；8·220 kV

高压配电装置

泄洪设施 坝上有 6 孔溢洪道（其中左、右两侧靠岸边的 2 孔为滑雪道式结构），底坎高程 742 m，孔口尺寸 13 m×19 m，最大泄流量 15600 m³/s。坝身有 2 孔兼做排沙用的泄洪中孔，孔口尺寸 4 m×4 m，底坎高程 680 m，最大泄流量 1154 m³/s。左右两岸各有 1 条泄洪洞，进口孔口尺寸 9 m×10 m，底坎高程 720 m，最大泄流量 4130 m³/s。在 760.3 m 设计洪水位时，总泄流量达 18000 m³/s，最大单宽流量 230 m³/s，最大流速 41 m/s。此外，右岸还有 1 条放空水库的隧洞。

基础处理 坝址基岩为石灰岩，地质复杂，两岸喀斯特及暗河发育，坝肩附近洞穴容积达 8 万 m³，坝脚下游 50 m 处有厚达 80 m 的软弱页岩及破碎带。

大坝基础防渗采用水泥灌浆帷幕。帷幕线沿坝轴线向两岸上游延伸，总长约 1000 m，帷幕底线最深处延伸至河床以下 200 m，帷幕体总面积为 18.9 万 m²，灌浆钻孔总长达 19 万 m，最大灌浆压力 6 MPa。右岸



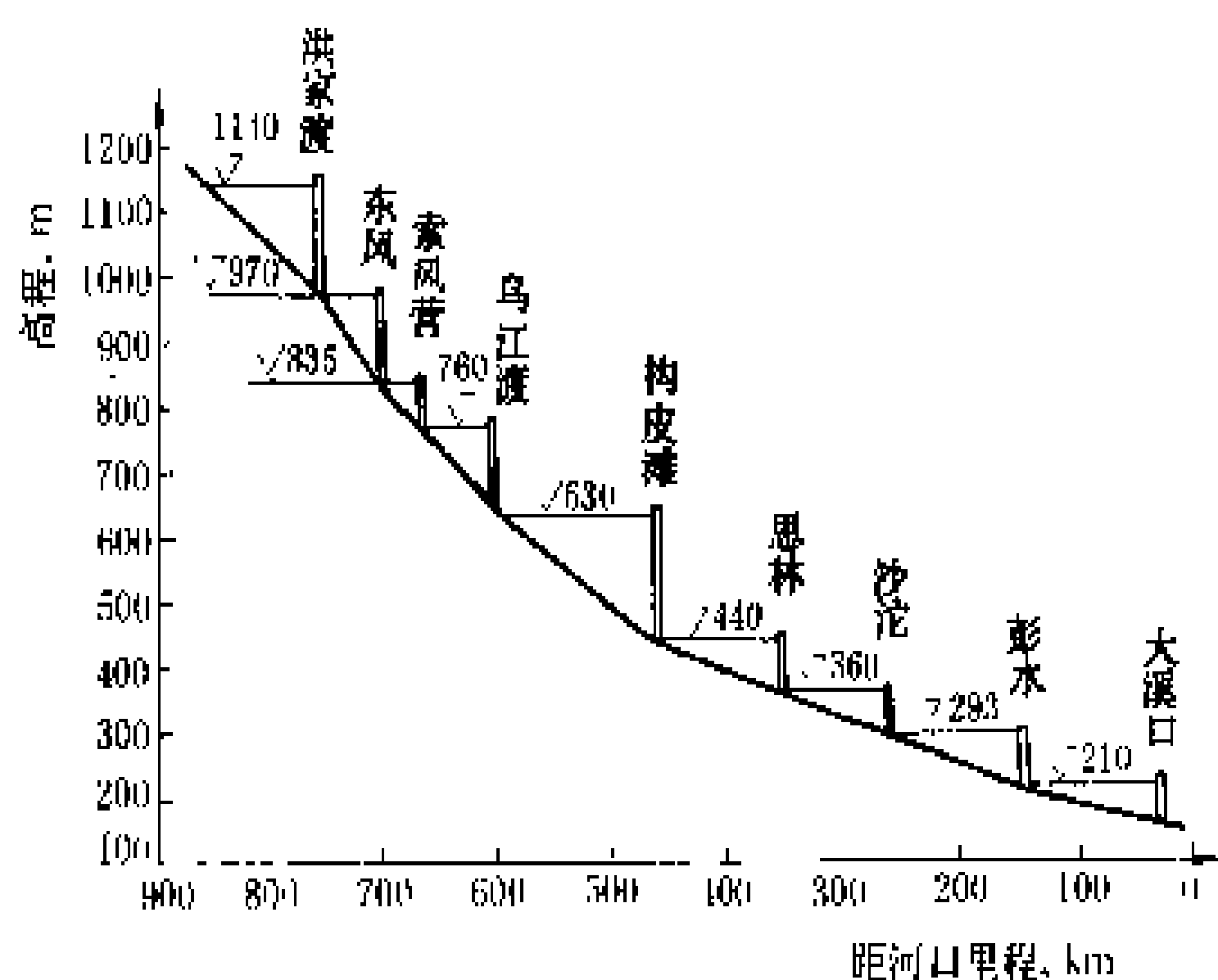
坝肩部分地段设置了混凝土防渗墙。河床以上较大溶洞清理后,回填混凝土。深部溶洞用高压灌浆处理。处理后,在120 m工作水头下,每24小时渗漏20 m³。

设计和施工单位 中南勘测设计院设计,水利电力部第八工程局施工。

(杨金栋)

Wujiang shuidian guihua

乌江水电规划 (hydropower development planning of Wujiang river) 根据1987年长江水利委员会和贵阳勘测设计院共同编制的《乌江干流规划报告》,乌江干流及其北源六冲河上布置有洪家渡、东风、索风营、乌江渡、构皮滩、思林、沙沱、彭水、大溪口9级水电站(见图)。梯级水电站共利用水头970 m,总库容175亿m³,调节库容105亿m³,共装机8560 MW,平均年发电量424.1亿kW·h。其中乌江渡水电站已建成发电,东风水电站正在建设。



乌江梯级水电站布置图

乌江源出乌蒙山东麓,分南、北两源,南源三岔河和北源六冲河汇合后始称乌江,流经贵州、四川两省,于四川省涪陵市汇入长江。干流河长1037 km,河水面自2260 m下降到136 m,天然落差2124 m,流域面积87920 km²,多年平均年水量534亿m³。乌江属典型的峡谷型河道,两岸多悬崖峭壁,河道狭窄,滩多流急,对外交通不便。

开发乌江的主要任务是发电,其次是航运,兼顾防洪及其他。乌江梯级水电站的可能开发水能资源占贵州省资源量的65%左右,且距用电负荷中心较近、地形地质条件较好,水库调节性能好而淹没损失相对少。除乌江渡和东风水电站外,洪家渡和构皮滩两水电站水库都能进行多年调节,是调节径流的骨干工程。这两座水电站和彭水水电站被定为继东风水电站之后要先开发的对象。

洪家渡水电站位于梯级的最上游,坝区岩性为灰

岩、泥灰岩,岩体完整均一,河床覆盖层厚4~7 m,地震基本烈度为6度。坝壅水高161 m,总库容45.9亿m³,可使其下游8级水电站增加保证出力103万kW。

构皮滩水电站为梯级中的第5级水电站。坝址岩性为灰岩,岩体完整,河床覆盖层厚1~3 m。地震基本烈度为6度,地质条件优越。坝壅水高197 m,总库容56.9亿m³,可提高下游4级水电站的保证出力约40万kW。

(陈励元)

Wusite - Yilimu Shuidianzhan

乌斯特-伊里姆水电站 (Ust - Ilim Hydropower Station)

位于苏联西伯利亚安加拉河上,布拉茨克水电站下游300 km处。电站装机容量4320 MW,多年平均年发电量217亿kW·h,以220 kV高压和500 kV超高压输电线路分别向西伯利亚联合电力系统和地区工业综合体送电。电站除有发电效益外,尚有航运效益。主坝为混凝土重力坝,最大坝高105 m。工程于1967年开始修建围堰,1975年初头3台机组投入运行,1979年装机16台,装机容量达3840 MW。

水文和水库特性 坝址以上流域面积73万km²,多年平均流量3220 m³/s,多年平均年径流量1016亿m³。水库正常蓄水位296 m,相应库容594亿m³,水库面积1892 km²。水库调节库容28亿m³,其上游来水由贝加尔湖和布拉茨克水电站的水库进行调节。坝址区最大洪水流量14900 m³/s。水电站设计水头85.8 m,最大水头91 m。

枢纽布置 坝址区基岩为坚硬的辉绿岩。电站枢纽由河床部分的混凝土重力坝、坝后式厂房和两岸连接土坝等建筑物组成,挡水前沿总长3840 m。混凝土重力坝顶长1452 m,上游面垂直,下游面坡度为1:0.7。溢流坝段位于河床左侧,长242 m,共设11个溢流孔,孔口宽15 m,高12 m,最大泄流能力为9700 m³/s。厂房坝段位于河床右侧,长440 m(含安装场长44 m)。电站进水口底坎位于正常蓄水位以下36 m,使首批机组可在70%的设计水头下发电。坝内埋设内径7.8 m的水轮机输水管道,其内水压力的80%~85%由管道外侧的钢筋混凝土承受,其余部分由管道的钢板衬砌承受。厂房内可装18台单机容量为240 MW的混流式水轮发电机组,现已装16台。水轮机转轮直径5.5 m。高压开关站设于右岸,220 kV出线6回,500 kV出线3回,并留有4回220 kV和1回500 kV的出线位置。左右侧挡水坝段共长837 m。左右两岸连接土坝共长2365 m。



工程量和投资 总工程量:混凝土浇筑 468 万 m^3 ;土方开挖 212 万 m^3 ;石方开挖 188 万 m^3 ;填筑土石方 709 万 m^3 。工程总造价 11.3 亿卢布,电力投资占 63%。

(高又生)

Wuqiangxi Shuidianzhan

五强溪水电站 (Wuqiangxi Hydropower Station) 位于湖南省沅陵县境内沅江干流上,上离沅陵县城 73 km,下距常德市 130 km,以发电为主,兼有防洪和航运等综合利用效益。装机容量 1200 MW,保证出力 255 MW,年发电量 53.7 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。以 500 kV 电压接入华中电网。拦河坝为混凝土重力坝,最大坝高 87.5 m。工程于 1986 年开工,计划 1994 年第一台机组发电。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 83800 km^2 ,占沅水全流域面积的 93%。多年平均流量 2040 m^3/s ,多年平均年径流量 643 亿 m^3 。平均年输沙量 1660 万 t。水库正常蓄水位 108 m,相应库容 29.9 亿 m^3 。死水位 90 m,死库容 9.7 亿 m^3 。水库防洪限制水位 98 m。拦河坝按千年一遇洪水 55900 m^3/s 设计,万年一遇洪水 67300 m^3/s 校核。水电站厂房及通航建筑物按百年一遇洪水设计,千年一遇洪水校核。水库千年一遇洪水位为 111.13 m,相应库容 35.1 亿 m^3 ;万年一遇洪水位为 114.2 m,相应总库容为 42.0 亿 m^3 。水库具有季调节性能。

枢纽布置 坝址岩层为前震旦系板溪群的砂岩、石英岩、板岩及千枚状板岩,软硬相间,具有次复理式构造。经多次构造运动的挤压破坏,结构面胶结不良。左岸断裂集中形成地质复杂地段。坝基渗漏以沿层间裂隙及破碎带的顺层为主。地震基本烈度为 6 度。

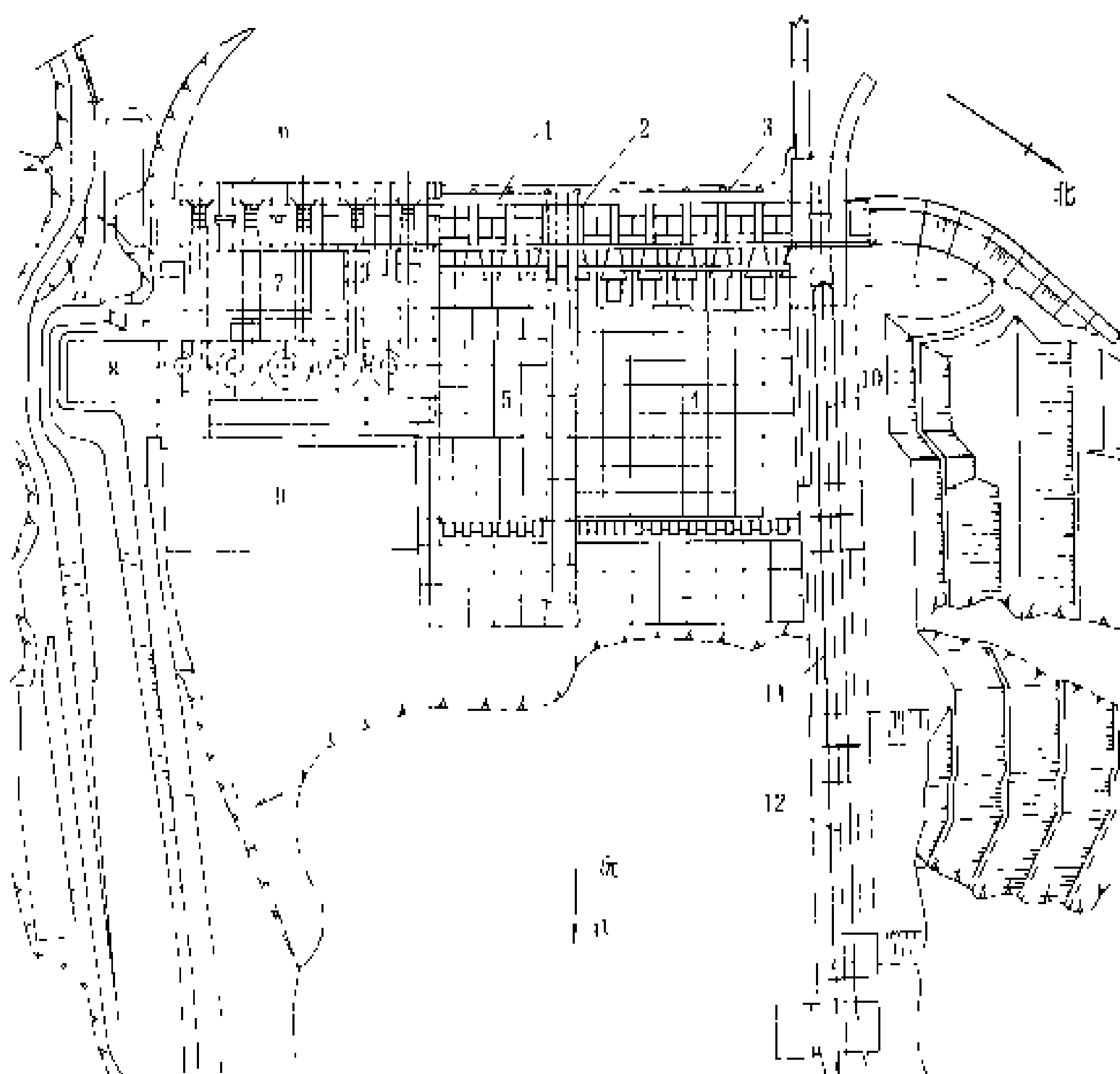
电站枢纽由混凝土重力坝、厂房及过船建筑物等组成,见图。

大坝坝顶高程 117.5 m,最大坝高 87.5 m,坝顶总长 724.4 m。溢流坝位于河床左侧主河槽,设有:19 m \times 23.3 m(宽 \times 高)表孔 9 个,堰顶高程 87.8 m,设计泄流量 39988 m^3/s ,最大泄流量 50522 m^3/s ;9 m \times 13 m(宽 \times 高)中孔 1 个,底坎高程 76 m,最大泄流

量 2586 m^3/s ;设在闸墩内的底孔 5 个,尺寸为 3.5 m \times 7 m(宽 \times 高),进口底部高程 67 m,最大泄流量 3015 m^3/s 。

坝后式厂房位于河床右侧,包括安装间全长 251 m,宽 36.5 m,高 68 m。内装 5 台单机容量 240 MW 的混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径 8.6 m,最大水头 60.1 m,最小水头 36.2 m,额定水头 44.5 m,额定功率 248 MW,额定转速 68.2 r/min,最高效率 95%,设计点效率 90.85%,保证加权平均效率 92.6%,吸出高度 +0.9 m。发电机单机额定容量为 266.67 MV \cdot A,额定功率因数 0.9,额定电压 15.75 kV。主变压器和高压配电装置布置在厂坝之间。主变压器为三相强油水冷式,单台容量 300 MV \cdot A。高压配电装置为 500 kV 气体绝缘金属封闭电器,出线 3 回。

连续三级船闸位于左岸,总跨越水头 60.9 m。



五强溪水电站枢纽平面布置图

- 1—坝表孔;2—坝中孔;3—坝底孔;4—左消力池;5—右消力池;6—厂房;
7—开关站;8—安装间;9—尾水渠;10—船闸;11—二闸室;12—三闸室

泄洪消能 枢纽泄洪的特点是水流佛氏数低,岩层抗冲能力弱。采用了表孔宽尾墩—底孔挑流—消力池联合消能工。利用宽尾墩水平方向的收缩影响,使出闸墩后水舌急剧收缩并在纵向拉开,闸墩下游坝面出现大片无水区,从宽尾墩出口至进入消力池过程中大量掺混气体,水舌本身急剧膨胀,入池后形成三元水跃,提高消能效果。底孔挑射水流入池旋滚,起掺混消

能作用,可缩短溢流前缘。采用雷伯克坎,可缩短下游海漫长度。联合消能工减少溢流前缘 24 m,使池长缩短 50 m,减少挖方 116 万 m³。

综合效益 除发电外,可将下游 159 万亩农田的防洪标准由五至十年一遇提高至二十年一遇。在航运方面,上游水库回水至大江口,库区险滩全部淹没,可改善上下游航道约 240 km。设计过坝年货运量 250 万 t,设计年过木量 45 万 t,远景可通行 2×500 t 驳船。

工程施工 枢纽建筑物主要工程量为:土石挖方 2234 万 m³,土石填方 168 万 m³,混凝土 406.6 万 m³,钢材 7.31 万 t。对外交通采用公路和水运相结合的方案。采用分期导流方式。

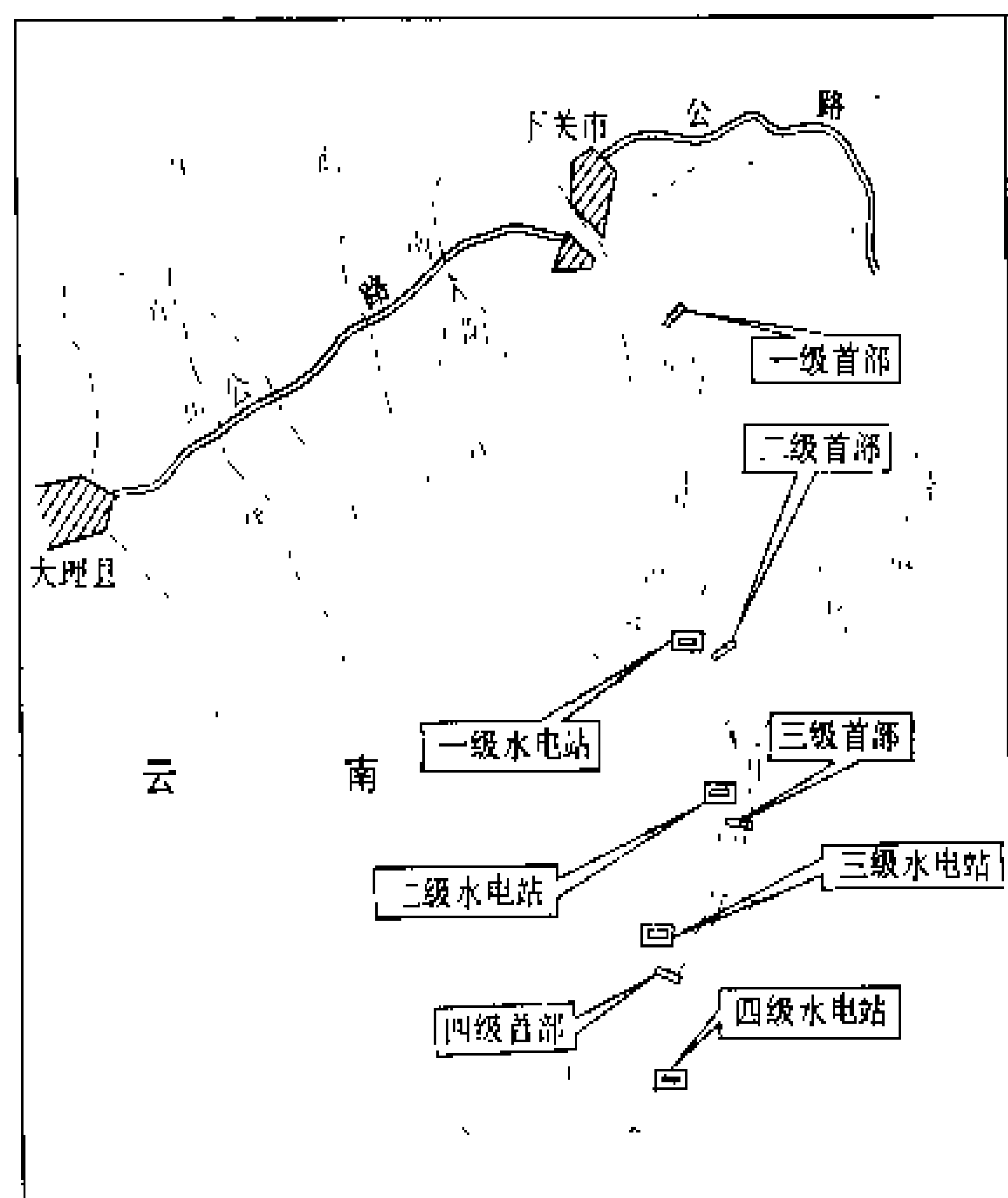
设计和建设单位 中南勘测设计院设计,业主单位为湖南省电力工业局,建设单位为五强溪水电工程建设公司,主要施工单位为水利电力部第八工程局。

(侯建功)



Xi' erhe Tiji Shuidianzhan

西洱河梯级水电站 (Xierhe Cascade Hydropower Stations) 位于中国云南省大理白族自治州西洱河上。西洱河是洱海的泄水通道。洱海为云南三大高原湖泊之一,常年湖水位 1973.5 m 时,湖面面积 250 km²,总容积 31.6 亿 m³。西洱河出洱海流经下关、漾濞等地,注入澜沧江支流漾濞江。河道大多穿行于深山峡谷之间,岸坡陡峻,水流湍急,落差集中,具有修建水电站的优良条件。河道全长 23 km,天然落差约 610 m。梯级水电站由 4 级电站组成(见图),均



西洱河梯级水电站位置示意图

为引水式开发,共利用落差 608 m,利用率为 99.7%。总装机容量 255 MW,多年平均年发电量设计为 11.07 亿 kW·h,后经复核为 9.03 亿 kW·h。首先建设的是四级电站,于 1958 年 10 月开工。最后建设的是三级电站,于 1980 年 12 月竣工。总投资 5.0597 亿元,平均每千瓦投资 1984 元。

西洱河梯级水电站为云南省电网主力电厂之一,

其装机容量占云南省电网 1990 年总装机容量的 11.23%。至 1990 年底,累计发电 87.41 亿 kW·h,平均发电成本 0.02235 元/(kW·h)。按电力系统发电企业 1990 年不变价格计算,累计产值 6.8943 亿元。对促进滇西及云南省工农业的发展起着重要作用。

西洱河梯级水电站由水利电力部昆明勘测设计院规划设计,水利电力部第十四工程局施工。

西洱河一级水电站 位于下关市下游约 10 km 处,首部枢纽位于下关湖盆地边缘天生桥处,坝型为潜孔式拦河闸,引水隧洞布置在河道右岸,洞径 4.3~5.6 m,长 8171 m,末端设有直径 4.8 m、高 76 m 的双室式调压井。设计水头 220 m,最大水头 245 m,最小水头 208 m。厂房为混合式地下厂房,装有 3 台单机容量 35 MW 的混流式水轮发电机组。工程于 1972 年 1 月开工,1979 年 12 月第一台机组发电,1980 年 12 月竣工。

西洱河二级水电站 首部枢纽位于一级水电站厂房下游约 100 m 处,拦河坝为混凝土重力坝。进水口设于右岸坝内,后接 22 m 长的钢筋混凝土明管,然后于坝址下游 26 m 处进入有压引水隧洞,洞长 2184 m,内径 4.3 m。设计水头 109 m,最大水头 121 m,最小水头 101.5 m。地面厂房内装有 4 台单机容量为 12.5 MW 的混流式水轮发电机组。工程于 1972 年 5 月开工,1978 年 7 月第一台机组发电,1980 年 12 月竣工。

西洱河三级水电站 首部枢纽位于二级水电站尾水渠出口下游 230 m 处。拦河坝为钢筋混凝土闸坝。进水口布置在右岸,下接引水隧洞,洞长 3266 m,洞径 4.3 m,末端设有带室圆筒式调压井。设计水头 101 m,最大水头 120 m,最小水头 97 m。地面厂房在大合江村上游河边,距二级水电站厂房 5 km,装有 4 台单机容量为 12.5 MW 的混流式水轮发电机组。工程于 1980 年开工,1987 年 10 月第一台机组发电,1988 年 12 月竣工。

西洱河四级水电站 拦河坝位于大合江村附近,为混凝土重力坝。引水隧洞布置在左岸,洞长 1960 m,洞径 4.3 m,末端设有带室圆筒式调压井。设计水头 109 m,最大水头 122 m,最小水头 100 m。地面厂房位于西洱河下游,漾濞江左岸河滩上,距三级水电站厂房约 3 km,装有 4 台单机容量为 12.5 MW 混流式水轮发电机组。工程于 1958 年 10 月开工,1961 年停工,1966 年复工,1971 年 12 月第一台机组发电,1972 年竣工。

(杨德晔)

Xiang - Zi - Yuan - Li shuidian guihua

湘资沅澧水电规划 (hydropower develop-

ment planning of Xiangjiang, Zishui, Yuanjiang and Lishui rivers) 湘江、资水、沅江、澧水都是注入洞庭湖的河流,然后汇入长江。湘江干流上布置有9级水电站,其支流耒水上布置有13级水电站。资水上布置有11级水电站。沅江干流及源流清水江上布置有15级水电站,其支流酉水上布置有6级水电站。澧水上布置有17级水电站,其支流溇水上有4级水电站,在另一支流漂水上有5级水电站。其中大型水电站有东江、柘溪、三板溪、石堤、凤滩、五强溪、淋溪河和江垅水电站。

湘江规划 湘江发源于广西灵川县海洋山,干流主要流经湖南省,全长856 km,流域面积94660 km²,在长沙处多年平均流量为2140 m³/s。支流耒水在湖南省衡阳市下游5 km处注入湘江。

据湖南省水利水电勘测设计院1986年编制的《湘江干流规划报告》和中南勘测设计院1982年编制的《湖南耒水梯级水电站开发报告》,开发湘江的首要任务是发展航运,远景考虑开发湘桂运河。湘桂运河将使湘江和珠江的支流桂江互相沟通通航。湘江干流规划自松柏至湘潭建成5级航道,湘潭至衡阳建成4级航道,衡阳以下建成3级航道。开发任务之二是发电。开发利用湘江水能资源有距用电中心近的优点,如供电给长沙、湘潭、株洲和衡阳等。其他任务为防洪和灌溉。为减少淹没损失,规划在上游建一座调节性能好的太洲水电站,下接青龙矶、高山庙、归阳、近尾洲、土谷塘、萱洲、淦田、易家湾8座低水头水电站。共利用水头100 m,共装机73.8万kW,平均年发电量为32.36亿kW·h。太洲水电站的技术经济指标见表。

耒水是湘江干支流中水能资源最丰富、开发条件最好的河流,宜以发电为主开发。规划布置13级水电站:石磨岭、石壁山、花木桥、东江、小东江、乔口、石面坦、程江口、永兴、上堡、耒阳、遥田、白渔潭等,共利用水头600 m,共装机97.7万kW,多年平均年发电量32.41亿kW·h。其中东江水电站有一座多年调节水库(已建设),可为中国华中电力系统的水电站群进行补偿调节。东江水电站的技术经济指标见表。

资水规划 资水发源于广西壮族自治区越城岭北麓,河源段称夫夷水,与支流赧水汇合后始称资水,于湖南省益阳市甘溪港注入洞庭湖。干流全长713 km,其中湖南省境内630 km。流域面积28142 km²,其中湖南省占95%。河口多年平均流量717 m³/s。据湖南省水利水电勘测设计院1985年编制的《资水流域规划意见》,资水的开发任务在上、中、下游各不相同。上游(小庙头以上河段)的任务是修建一些调节水库以满足地区成片旱区灌溉用水,也为中、下游河段梯级水电站增加保证出力和年发电量。中游(小庙头到马迹塘)

的任务以发电、防洪为主。这一河段水能资源相对丰富,又具有修建较大水库的地形地质条件,除能提高发电效益外,还可安排一定的防洪库容以解决下游尾间地区防洪问题。马迹塘以下的下游河段,两岸低矮,只能建一些低水头径流式水电站。资水干流梯级水电站由犬木塘、孔雀滩、神滩渡、筱溪、浪石滩、柘溪、敷溪口、金塘冲、马迹塘、白竹州、修山共11座水电站组成,共装机113.25万kW,其中柘溪和马迹塘两级水电站已经建成,装机50.3万kW,还有62.95万kW尚待开发。其中犬木塘和柘溪两座水电站分别具有多年调节和年调节水库,是骨干工程。从灌溉方面看,犬木塘水库等可直接供水灌溉的面积为10.3万ha,在其下游还可提供8.7万ha农田的灌溉用水。从敷溪口水库引水灌溉的灌区面积有4.5万ha。在柘溪和敷溪口两水库预留防洪库容,可使下游尾间地区的防洪标准从五年一遇提高到三十年一遇。航运方面由于各级水电站的正常蓄水位与上级水电站的尾水位相衔接,使从双江口到修山415 km的河道得以渠化,发展水上运输。犬木塘和敷溪口两座水电站的技术经济指标见表。

沅江规划 沅江有南、北两源,南源龙头江发源于贵州省都匀县的云雾山;北源重安江发源于贵州省麻江县平越山。两源汇合后称清水江,东流至黔城与渠水汇合后始称沅江,于湖南省常德德山注入洞庭湖。沅江较大的支流有渠水、沅水、巫水、溆水、辰水、武水和酉水。水能资源比较丰富且开发条件较好的是沅江干流和支流酉水。沅江流域面积90000 km²,干流全长1028 km,总落差1033 m,在凌津滩水电站处(流域面积83950 km²)的多年平均流量为2100 m³/s。酉水流域面积18530 km²。

根据中南勘测设计院1989年编制的《沅江河流规划》,沅江干流的开发以发电为主,兼顾防洪、航运。沅江是洞庭湖4水中水能资源最丰富的,占4水总量的46%。对于煤炭资源较缺的湖南省,开发沅江占重要地位。防洪对象主要是沅江尾间,主要依靠设置分洪区减少洪灾。改善沅江航道的措施是由水电站水库淹没浅滩、水库调节流量增加水深并配合航道整治措施,使大江口到桃源(长295 km)段达5级航道,桃源到德山段达4级航道(长51 km)。据上述任务在沅江干流规划布置革东、三板溪、桂治、远口、白市、托口、江市、洪江、安江、铜湾、清水塘、大淤潭、渔潭、五强溪、凌津滩共15级水电站,共装机406.85万kW,平均年发电量173.19亿kW·h。其中三板溪和五强溪水电站是骨干电站,各具有40多亿m³库容,其技术经济指标见表。

酉水的开发任务主要是发电,兼顾其他。规划布置

的梯级有湾塘、塘口、石堤、碗米坡、凤滩、高滩共 6 级水电站，共装机 139.35 万 kW，多年平均年发电量 51.28 亿 kW·h。其中石堤和凤滩（已建）水电站的调节性能最好，其技术经济指标见表。

湘资沅澧 4 河主要水电站技术经济指标表

河流名称	电站名称	流域面积 (km²)	多年平均流量 (m³/s)	正常蓄水位 (m)	总库容 (亿 m³)	调节库容 (亿 m³)	防洪库容 (亿 m³)	装机容量 (万 kW)	年平均发电量 (亿 kW·h)	灌溉面积 (ha)	改善航道 (km)
湘江	大洲	9172	294	125	18.2	7.6		10.8	4.3		71
资水	东江	4719	114	285	81.2	56.7		50	13.2		
	石塘岭	701	25	715	5.4			4	1.45		
	大木塘	1476	59.3	370	13.1	10.4		6	2.22		
	柘溪	22640	613	169.5	30.2	22.58		44.75	25.2		
	戴溪口	25300	679	94	6.6	2.3		27	13.3		
沅江	三板溪	11050	239	475	47.26	29.3	2.6	68	22.85		
	五强溪	81350	2040	108	42	20.2	13.6	168	65.12		
酉水	石堤	5400	164	370	43.9	28.1		66	13.58		
	凤滩	17500	504	205	15.5	10.6		40	23.6		
澧水	凉水口	982	44.9	420	20.8	11.6		12	3.34	853	27
	宜冲桥	5823	184	140	8.59	1.05	2.5	4	2.7	2407	30
溇水	淋溪河	2420	92.4	480	31.9	21.4		80	15.7		106.4
	江垭	3711	134	238	18.1	11.7	7.4	40	9.8	2587	54.8
溇水	黄虎港	1140	42.3	360	15.4	8.8	2.0	21	4.15		7.1
	皂市	3000	101	115	9.9	1.6	7.8	4.8	1.98	5760	51.3

澧水规划 澧水发源于湖南省桑植县，注入西洞庭湖，流域面积 18583 km²，河口处多年平均流量为 523 m³/s。澧水干流全长 390 km，主要支流有溇水、洪

水。据湖南省水利水电勘测设计院 1991 年编制的《澧水流域规划报告》，开发澧水的主要任务为防洪，兼顾灌溉、发电和航运。澧水是洞庭湖 4 水中洪旱渍涝灾害最多的河流。1935 年洪灾使 3 万余人死亡。1988 年出现的渍灾面积达 55867 万 ha。澧水流域年年都有不同程度的旱灾，平均每年受灾面积约 4 万 ha。开发利用澧水水能资源可促进山区县城实现电气化。据上述任务在澧水干流布置 17 级水电站：凉水口、贺龙、八斗溪、鱼潭、花岩、木龙滩、红壁岩、黄家铺、宜冲桥、岩泊渡、茶庵、慈利、茶林河、三江口、青山、艳州、新街水电站，合计装机容量 64.42 万 kW，平均年发电量 29.91 亿 kW·h，总库容 39.21 亿 m³，其中调节库容 19.52 亿 m³，防洪库容 2.5 亿 m³。其中宜冲桥是调节干流洪水的主要水库。在支流溇水布置淋溪河、江垭、关门岩、长潭河共 4 级水电站，合计装机容量 129.4 万 kW，平均年发电量 29.19 亿 kW·h。总库容 50.76 亿 m³，其中调节库容 33.2 亿 m³，防洪库容 7.4 亿 m³。江垭水电站是承担调节洪水的主要水库。淋溪河水电站位于最上游，是适应用电要求调节径流的骨干工程。支流溇水布置黄虎港、所街、中军渡、磨市、皂

市共 5 级水电站，合计装机 37.45 万 kW，平均年发电量 9.53 亿 kW·h，总库容 26.84 亿 m³，调节库容 14.45 亿 m³，防洪库容 9.8 亿 m³。皂市水电站水库是控蓄洪水的主要承担者。黄虎港水电站位于最上游，是适应用电要求调节径流的骨干工程。实施以上规划将使澧水尾间的防洪标准提高到二十年一遇。

（曾学敏）

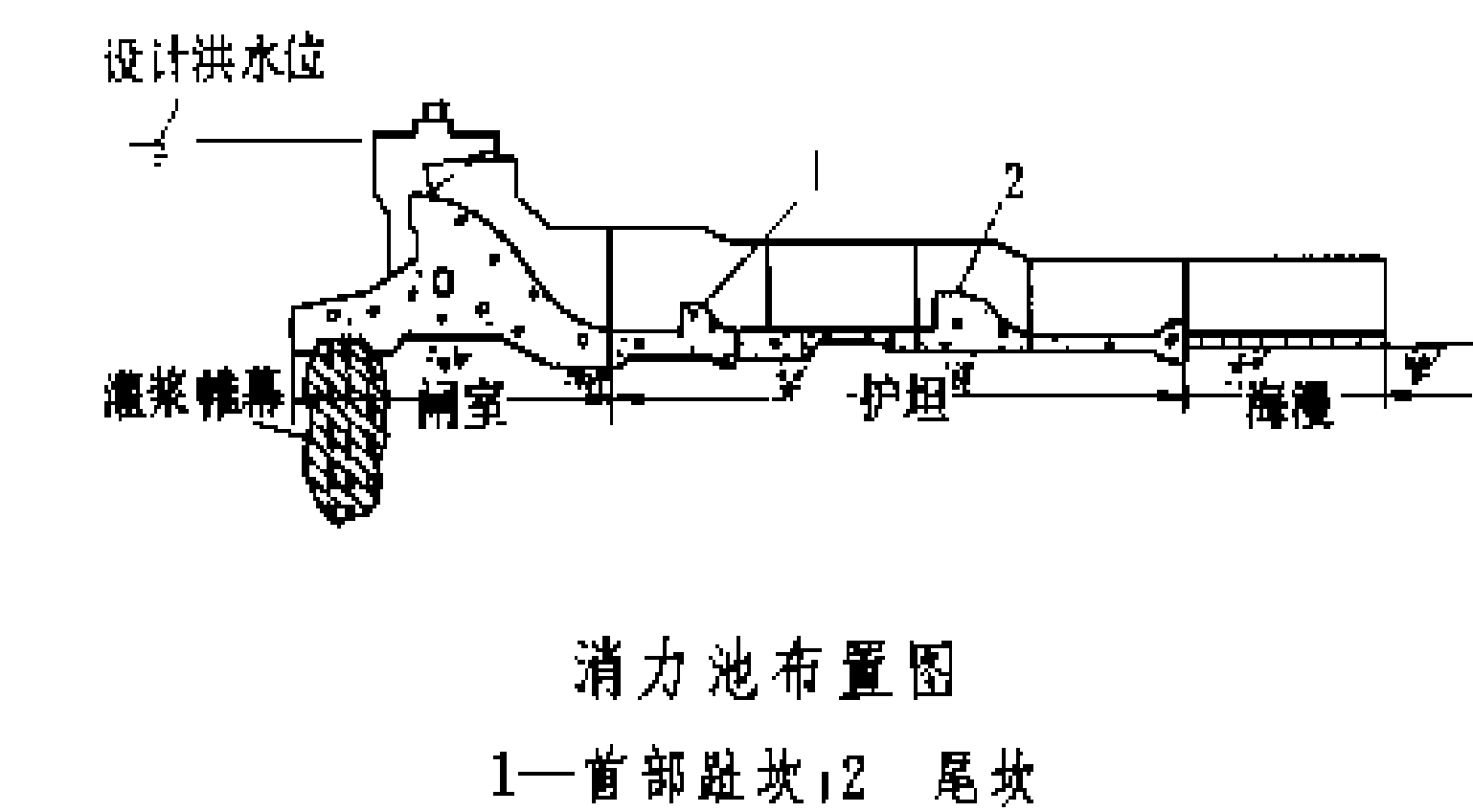
xiaolichi

消力池（stilling basin） 设于泄水建筑物末端，对过坝急流利用底流水跃消能的水工建筑物，也称水跃消能塘。在消力池内水流从急流突变为缓流，与下游河道水流衔接。消力池对尾水位变幅大时适应性好，消能比较充分，有利于减轻河床及岸边冲刷。

消力池布置 消力池上游端以反弧段与溢流坝面、闸室出口或陡槽连接，下游设防冲海漫。消力池底板高程可以与天然河床一致，如尾水深度不够时可开挖降低池底或在池尾设消力坎以提高下游尾水深度，也可采用池、坎结合的消力池，保证在池内产生正常水跃。消力池布置，见图。消力池长度和深度应能在各种可能的水流条件下形成水跃消能。为减少消力池长度常采用辅助消能设施，如首部趾坎、前墩、尾坎等，但要注意防汽蚀问题。

底板结构 消力池底板均要设变形缝，缝内设止

水片,底板下设排水管,防止高速水流钻到底板以下产生动水压力,掀动底板,特别是消力池上游反弧末端出现收缩水深处,应特别注意防止动水压力和浮托力破坏底板。



运行要求 消力池在运行中要防止开启个别闸门,以防下游尾水深度不够而出现远趋水跃,或闸门不对称开启时出现折冲水流造成消力池底板及海漫的破坏。因此最好将所有闸孔均匀同步启闭,以防止消力池内出现不均匀水流和回流,这种不均匀水流将使池底板载荷复杂,而且容易将下游的石碴卷入消力池内,造成底板磨损和由此而引起的汽蚀破坏。当闸孔很多时,为便于各种流量的宣泄,可用隔墙将整个消力池分成若干消能区,进行分区消能。

(林可冀)

xiaoliu

消力库 (roller bucket) 设于泄水建筑物末端,采用淹没式库斗对过坝急流进行面流消能的水工建筑物。消力库消能的特点见泄水建筑物面流消能。消力库的流态和下游尾水位关系密切,随着尾水位降低,稳定的库流将逐步转变为临界库流、挑流;随着尾水位升高,稳定的库流可逐步变为淹没库流和潜底库流。流态变化见图 1。

图 1 消力库的流态变化
(a)挑流;(b)临界库流;(c)稳定库流;(d)淹没库流;(e)潜底库流

消力库水流所形成的涌浪及表面高流速的波浪延续较长的距离,易引起岸边冲刷,同时底部旋滚易将石

块卷进库斗内而造成磨损,应加以防护。消力库消能不如消力池充分,其对下游河床的地质条件要求介于挑流鼻坎和消力池之间。水头不很高的工程,当尾水位变

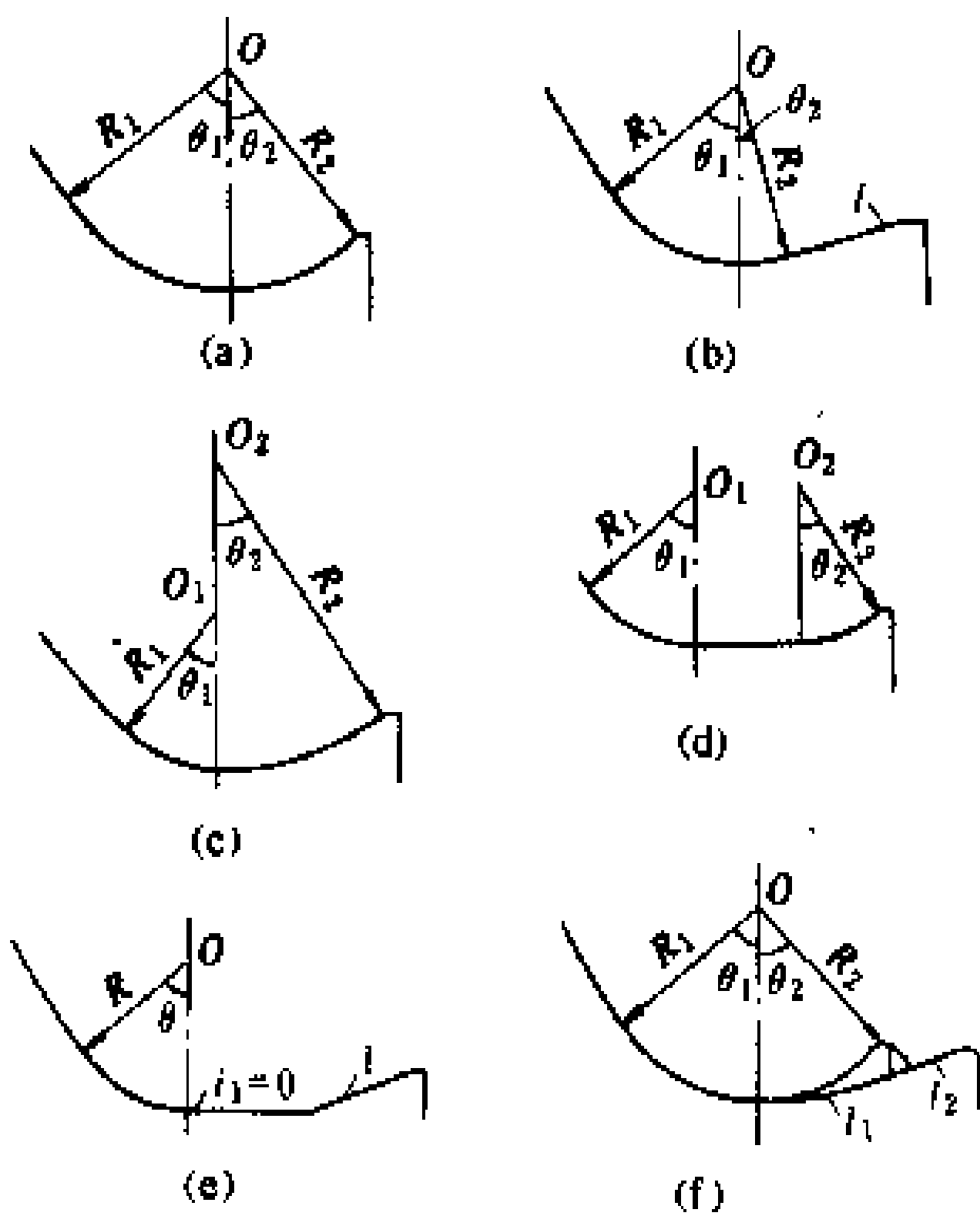


图 2 消力库体型

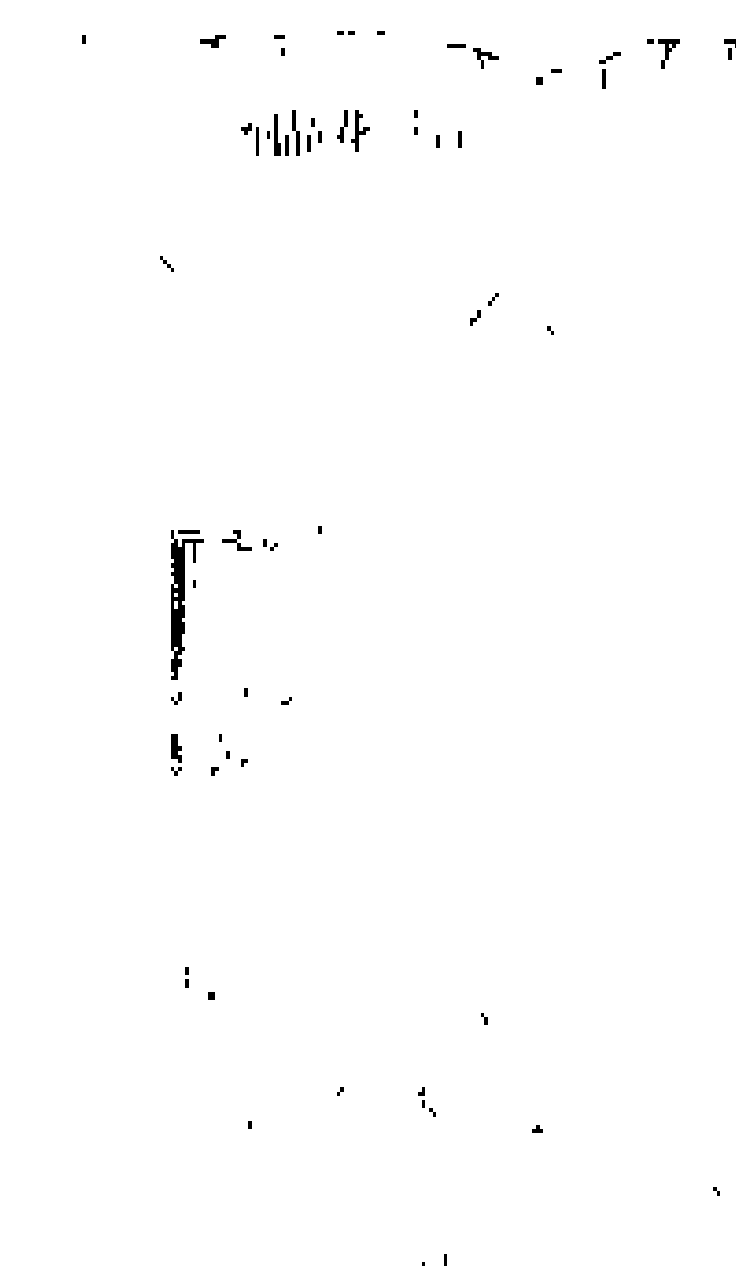
(a)单圆弧;(b)单圆弧加直线挑坎;(c)双圆弧;(d)双圆弧加水平台;(e)单圆弧加折线挑坎;(f)单圆弧加差动坎

化不大时,可研究采用这一消能方式。建造消力库比消力池简单,工程量较省。

消力库的体型根据不同的反弧半径、库坎的挑角分 7 种,见图 2。图中 R, R_1, R_2 分别为各圆弧段的半径; O, O_1, O_2 分别为各圆弧的中心; $\theta, \theta_1, \theta_2$ 分别为各圆弧段的圆弧角; i, i_1, i_2 分别为各斜坡段的坡度。

目前已建工程中采用消力库的有中国的石泉水电站,美国的大古力(Grand Coulee)水

图 3 消力库工程实例
(a)大古力水电站;(b)石泉水电站



(林可冀)

Xiaolangdi Shuli Shunlu

小浪底水利枢纽 (Xiaolangdi Hydro pro-

Xiao 小

ject) 位于黄河干流河南省洛阳市以北 40 km 处,在三门峡下游 130 km。枢纽以防洪、防凌、减淤为主,兼顾供水、灌溉和发电。装机容量 1800 MW,多年平均年发电量约 58.5 亿 kW·h。用 220 kV 输电线路

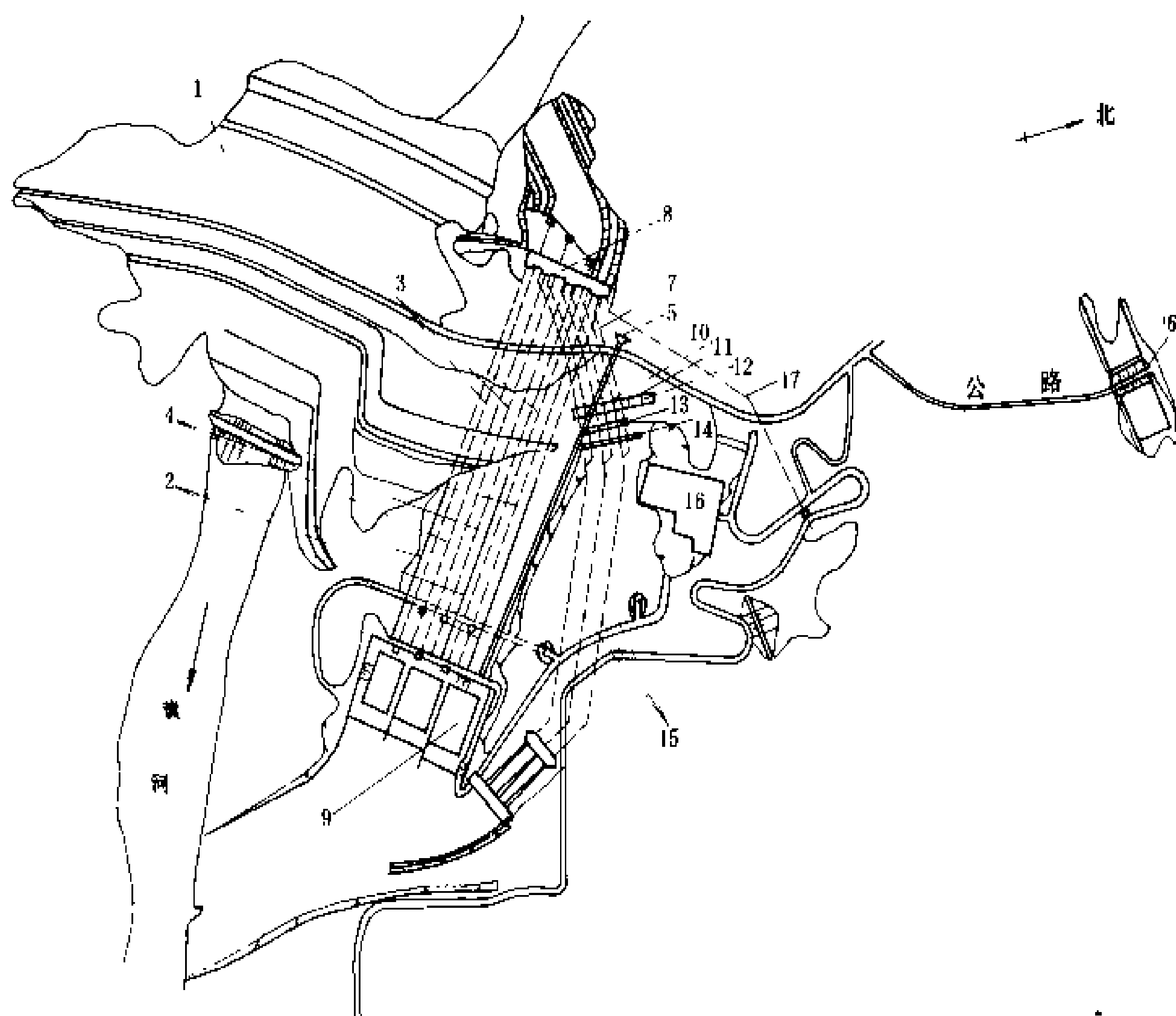
泄洪洞、排沙洞、灌溉洞和发电引水隧洞的进口共用一个组合式进水塔群。塔群由 10 个进水塔组成,总宽 280 m,高 112 m。

(1)主坝。壤土斜心墙堆石坝,坝顶长 1317 m,坝

顶高程 281 m,最大坝高 154 m,坝基采用混凝土防渗墙防渗。

(2)泄水建筑物。包括 3 条明流泄洪洞、3 条孔板泄洪洞、3 条排沙洞、1 座正常溢洪道和 1 座非常溢洪道。

明流洞的断面为城门洞形,尺寸分别为 10.5 m×13 m,10 m×12 m 和 10 m×15 m;每条洞长(含出口明流段)约 1100 m;进口底坎高程分别为 195.0 m,209.0 m 和 225.0 m,在校核水位 275.0 m



小浪底水利枢纽平面布置图

1 主坝;2—明流泄洪洞;3—孔板泄洪洞;4—排沙洞;5—正常溢洪道;6—非常溢洪道;7 发电引水隧洞;8—组合式进水塔群;9 消力塘及消力塘二级池;10—主厂房;11—安装场;12—副厂房;13—主变压器洞室;14—尾水闸门室;15—明流尾水洞;16—开关站;17—灌溉洞

6 回和 500 kV 输电线路 2 回向洛阳、郑州等地供电。枢纽的前期准备工程于 1991 年 3 月开工。计划 1994 年主体工程开工,1997 年截流,2000 年头 2 台机组发电,2001 年竣工。

水文和水库特性 坝址以上流域面积为 69.4 万 km²,多年平均年径流量 423.2 亿 m³。设计洪水标准为千年一遇,相应洪水流量 28000 m³/s,相应库水位 274.5 m,相应库容 125.5 亿 m³。校核洪水标准为万年一遇,相应洪水流量 37700 m³/s,相应库水位 275.0 m,相应库容 126.5 亿 m³。正常蓄水位 275.0 m,相应库容 126.5 亿 m³。死水位 230.0 m,相应库容 40.8 m³。水轮机额定水头 112.0 m,最大水头 140.0 m,最小水头 90.0 m。

枢纽布置 由壤土斜心墙土石坝、泄洪洞、排沙洞、灌溉洞、溢洪道和引水式电站等主要建筑物组成,全部泄洪排沙建筑物、灌溉建筑物和引水发电建筑物均布置在左岸,见图。

时,单洞下泄流量 6450 m³/s。

排沙洞的断面

为圆形,直径 6.5 m,采用后胀法预应力混凝土衬砌,单洞最大泄量 2025 m³/s。

孔板泄洪洞系由导流洞改建。圆形断面,直径 14.5 m。采用双孔单洞方式,用孔板消能。进口段采用龙抬头的形式与原导流洞衔接。进口底板高程 175.0 m,库水位 275.0 m 时,总泄流量 4695 m³/s。

正常溢洪道为陡槽式,进口高程 258.0 m,泄槽宽 28 m,在库水位 275.0 m 时,下泄流量为 3760 m³/s。非常溢洪道布置在左岸桐树岭以北,宽 100 m,溢流底板高程 268 m,底板以上建心墙堆石坝挡水,泄洪时需爆破坝体,在库水位 275.0 m 时,泄流量为 3000 m³/s。

(3)引水发电系统。6 条引水隧洞,分别向 6 台水轮发电机组供水。洞长约 300 m,洞径 7.8 m,单洞最大引水流量 305 m³/s。

每 2 台机连接 1 条尾水洞,城门洞形断面,尺寸为 12 m×18 m。

主厂房为地下式，尺寸为 251.5 m×25 m×61.4 m，内装6台单机容量为300MW的混流式水轮发电机组。水轮机转轮直径 6.3 m，额定转速 115.4 r/min。

500 kV 和 220 kV 开关站为屋外式，高型布置，位于左岸地面，面积分别为 200 m×102 m 和 131 m×117 m。

施工导流及施工安排 采用断流围堰，左岸 3 条导流洞泄洪的导流方式。施工导流按百年一遇洪水标准设计，设计洪水流量 18010 m³/s。

枢纽总工程量为：土石方开挖 4341 万 m³，土石方填筑 6040 万 m³，混凝土浇筑 270 万 m³，金属结构安装 3.7 万 t。

设计安排主体工程工期为 8 年。

设计和建设单位 黄河水利委员会勘测规划设计院设计，建设单位为小浪底水利枢纽建设管理局。

即：不污染大气；使用再生能源，无能源枯竭之虑；成本低廉等。但与大水电相比较，又有许多不同点。缺点

部分国家和国际组织划分小水电的标准

国家或国际组织	微型水电容量范围或上限 (kW)	小小型水电容量范围或上限 (kW)	小水电容量范围或上限 (kW)	注
联合国工业发展组织 (UNIDO)	100	101~1000	1001~10000	1980 年
联合国新能源与可再生能源大会	1000		1001~10000	1981 年
拉美能源组织 (OLADE)	50	51~500	501~5000	
中 国	100	101~500	501~25000	1990 年
印 度	100	1000	1000~15000	
马 来 西 亚		25~500	5000	
尼泊尔、菲律宾			10000	
泰 国	200	201~6000	6001~15000	
日 本			10000	
加 拿 大	50	2000	10000	
法 国		1000	10000	
瑞 典		100	15000	
美 国			20000	
新 西 兰		10000	50000	

xiaoshuidian

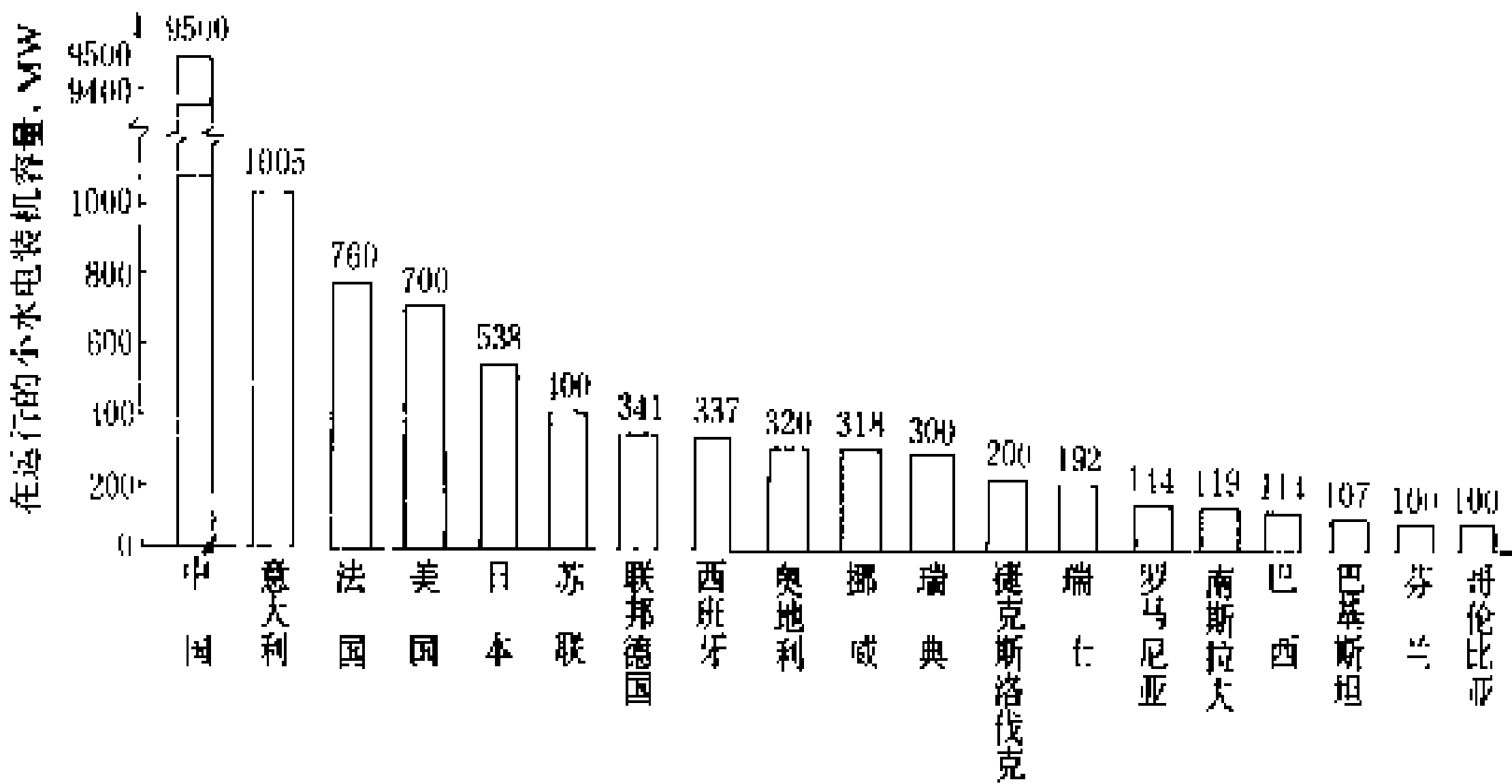
小水电 (small hydropower) 发电能力很小的水电站或水力发电装置。世界各国对小水电，没有一致的定义和容量范围的划分界限。即使同一国家，不同时期，标准也不尽相同。一般，按发电容量可把小水电划分为微型 (micro)，小小型 (mini) 和小型 (small) 3 档。有的国家只有一个档次，有的国家则分为两个档次，差异较大。几个小水电较发达的国家和主要国际组织对小水电的划分标准见表。

由于标准不同，统计口径不一致，难于进行全世界关于小水电的统计。《国际水力发电与大坝建设》 (International Water Power & Dam Construction) 1990 年出版的《1990 小水电》刊登了全球 19 个小水电总装机容量超过 100MW (单机容量小于等于 2MW 的项目) 的国家的排列图 (见图)，对世界各国小水电的发展概况提供了一个初步概念。

小水电具有与大水电 (large hydro) 相同的优点，

有：①这类水电站，多数无调节性能好的水库，发电能力有明显的季节性，年际间所能提供的电能也不均衡，适应负荷的能力差；②单站装机容量小，水电站位置很分散，难以远距离传输，对大电力系统的作用不大。优点有：①对生态环境影响的正效应大，负效应较小，甚至没有；②淹没土地少，移民问题小，且容易解决；③多数情况可用当地建筑材料，可吸收当地劳动力建设，从而降低建设费用；④设备易于标准化，有利于降低成本，缩短建设工期；⑤一般距负荷近，电能损耗小。因此，小水电比较适用于向广大农村和山区供电。

世界小水电的发展 最早修建的一批小水电站是



1990 年小水电总装机容量超过 100 MW 的国家排序图

在 19 世纪晚期至 20 世纪初。如美国第一座小水电站威斯康星 (Wisconsin) 州福克斯 (Fox) 河上的容

xiao 小

量为 10.5 kW 小水电站建于 1882 年;南半球第一座小水电站——新西兰里夫顿(Refton)的容量为 20 kW 小水电站建于 1988 年;中国境内最早出现的小水电站是日本帝国主义侵占台湾省时期,于 1905 年在新店溪支流上修建的龟山发电站;而中国大陆的第一座小水电站是云南省石龙坝水电站的第一厂,装有 2 台单机容量为 240 kW 的混流式水轮发电机组,1910 年 7 月动工,1912 年 4 月投产。

20 世纪二三十年代后,大工业和大城市的用电负荷迅速增长,电力系统的规模不断扩大,小水电对电力系统的作用越来越小,且其单位千瓦造价较高。当时,大中型水电工程技术已日趋成熟,因而许多发达国家大规模修建大中型水电站,小水电不但发展很少,甚至停运拆除大批小水电站。20 世纪中期,一些原来小水电比重很大的国家,其小水电比重迅速下降,如挪威,1944 年小水电装机容量占全国水电站总装机容量的 26.6%,到 1979 年小水电的比重只有 4%了。

70 年代后期,能源危机出现,多数发达国家水能资源已开发到一定程度。开发条件较好的大中型水电站站址几已开发殆尽,造价也增加,生态保护的要求对开发大中型水电站的制约又日益严重,因此,在 80 年代又重新出现世界范围兴建小水电的高潮。挪威在 1979 年查勘了 300~1000 kW 的小水电站 500 座,其中包括不少以前停、拆的小水电站。美国对原为防洪、灌溉等非动力用途的 50000 座大坝,进行了研究,发现其中有 15000 座可安装小水电,每座的可安装容量为 1000~1500 kW,总容量可达 26600 MW;此外改造一批小水电站,还可增加容量 10800 MW。

此时,许多发展中国家也制定了小水电发展计划,小水电建设在 80 年代大都有不同程度的发展。这一时期,中国的小水电建设进入了持续稳定发展阶段,每年新增装机容量 700 MW 左右。

在推动小水电发展方面,联合国有关组织多次召开国际会议。第一次国际小水电会议是 1979 年在尼泊尔首都加德满都召开的,会议发表了《加德满都宣言》(关于国际合作决议)。后来 1981 年 8 月 10~21 日,在肯尼亚首都内罗毕召开的、有 124 个国家近 4000 人参加的联合国新能源与再生能源大会上,小水电作为最现实、经济的可再生能源,受到了普遍重视。经联合国倡议,由中国政府承办,在中国杭州建立了亚太地区小水电研究培训中心,以加强国际交流与合作。

中国小水电的发展 中国的小水电资源十分丰富,理论蕴藏量约 1.5 亿 kW,可开发容量 70000 多 MW,相应年发电量约 2000~2500 亿 kW·h。

1949 年以前,中国仅有小水电站 20 余处,总容量 2000 多 kW。50 年代,结合水利工程建设,建设了一

批小水电站,共 8975 座,总容量 255 MW。

60 年代,国家大电力系统发展较快并向部分农村延伸,因此这一时期小水电发展缓慢。1969 年国务院在福建省永春县召开了全国小水电现场会议,总结推广永春县自力更生办小水电的经验,制订了“谁建、谁管、谁有”等政策和“治水办电相结合”的规划方针。充分调动了各地的积极性,形成了 60 年代至 70 年代全国小水电的大发展时期。到 1979 年,全国小水电总装机容量达到 6300 余 MW。

1983 年,国务院正式制订颁发了“积极发展小水电,建设中国式农村电气化试点县”的计划。并由水利电力部制订颁发了初级农村电气化县标准 SD178-86,同时选定 100 个以建设小水电供电为主的初级农村电气化试点县。计划从 1985 年正式实施,1990 年超额完成,共有 109 个县达到了预定标准。5 年间,109 个县的小水电装机容量由 1406 MW 增加到 2446 MW。1991 年 3 月又开始了建设第二批 200 个初级农村电气化县的计划,要求 1995 年建成。

由于农村经济发展的要求,同时采取了正确的政策,中国的小水电建设取得了巨大的成绩。到 1991 年底,中国小水电装机容量达到了 13446 MW,年发电量 371 亿 kW·h。

小水电的特点及其技术发展方向 小水电和大中型水电站一样,都是水力发电,但它不是小型化的大水电。小水电本身具有一系列特点,如:①分散性,即单站容量不大,但其资源到处存在;②对生态环境负影响很小;③简单性,即技术是成熟的,无须复杂昂贵的技术;④当地化,即当地群众能够参与建设,并可尽量使用当地材料建设;⑤标准化,即较易于实现设计标准化和机电设备标准化,以降低造价、缩短工期。小水电的规划、设计、施工、设备制造和运行管理要适应这些特点,方能达到技术先进、运行可靠、投资经济和成本低廉。

小水电发展的主要方向有:

(1) 加强规划。一些国家和国际组织编制出版了一些规定、导则和手册,如:1980 年美国垦务局制订的《在现有工程上发展小水电的评估报告》;1982 年美国陆军工程师团编制的《小水电可行性研究手册》;1991 年中国水利部颁发的《农村水电及其电网规划导则》和《小水电建设项目经济评价暂行规定》;1991 年联合国亚太经社会与欧洲共同体合作编辑出版的《农村电气化导则》等。这些指导性文件,除载有小水电规划设计中的技术方法、技术标准、经济分析和财务分析方法等具体工作内容外,对小水电及其电网的规划指导思想也有所阐明,如:尽可能实现河流多目标开发,取得防洪、灌溉、航运、供水、水产养殖、旅游等综合

效益;在防洪、灌溉等非发电水库装机发电;分散布点,就地供电,既可有效利用水能资源,又可避免长距离输电;尽可能实现河流梯级开发,在上游山区修建龙头水库,既能提高小水电的调节性能,又无很多淹没和移民,对生态环境也不致产生很大负影响等。

中国制订了“积极发展小水电,建设中国式农村电气化试点县”计划,并分阶段选定一批又一批县,作为试点。在实施计划过程中,对规划、设计、施工、验收和运行管理等各阶段工作制订了一整套技术规范,并提出了多种发展模式,具体指导各县的规划工作。这种做法,加快了小水电的发展。

(2) 简化设计和采用简单适用的机电设备。世界各国对此进行了大量摸索,特别是对小小型和微型水电站,积累了不少经验。在土建方面,如:1968年马来西亚国家电力局编写的《小水电简易、低造价土建工程的设计与施工基本导则》,初步总结了东南亚国家的经验,针对可行性研究、现场勘测、发标、承包等阶段,提出了一些简化措施和简易设计方案,如虹吸式电站进水口,采用PVC、HPDE等非传统材料压力管道,简化工艺等。在机电方面,如:采用无导水叶水轮机;采用电子负荷控制器代替调速器;采用异步发电机;采用线路重复器;采用模式变电站等。

(3) 采用当地材料。中国在这方面的经验十分丰富。已建坝高30 m以下的各种土坝近8万座,坝高超过20 m的浆砌石拱坝500余座。其他还有浆砌石重力坝、圉工硬壳坝、干砌石坝,以及各种土石坝、堆石坝等。

(4) 标准化。对水轮机的标准化和系列化,各国观点比较一致。1986年联合国工业发展组织(United Nations Industrial Development Organization, UNIDO)编制的《小型水轮机应用导则》中,一半以上篇幅讨论这个问题。中国在小型水轮机标准化方面,作了不少工作,如:①制订小型水轮机转轮型谱,覆盖2~260 m水头范围;②在模型转轮型谱基础上,经调整补充,进行统一设计,形成500 kW以下,8个转轮、32个品种的水轮机产品,覆盖水头范围2~270 m,流量范围0.07~8.6 m³/s;③经过对已建成的同类电站进行调查,并结合型谱要求,制订了500~10000 kW的定型产品,包括19个转轮、53个品种,覆盖水头范围3~450 m,流量范围0.26~2.05 m³/s。采用标准化产品,从某一具体机组,有可能效率低一点,但价格便宜,交货期短,设计资料现成,对农村小水电,仍是利大于弊。

土建标准化,一般认为比较困难,但也有许多尝试。1987年5月联合国工业发展组织在中国杭州召开“小水电标准化专家组会议”,会上工业发展组织秘书

处介绍了瑞典、挪威等国家提出的6种小型水轮机及厂房定型设计。

采用标准化设计和定型机电设备,可大幅度降低造价。20世纪80年代中期,印度尼西亚在北索马利亚(Sumalia)建造6座水头、流量相近的小水电站,采用容量为750 kW的同型号机组和标准化的进水口、闸门压力管道、厂房等,其单位造价为1439美元/kW;而另5个同类型小水电站,采用非标准设计,平均单位造价为3006美元/kW。

(5) 选择合理的自动化水平。小水电及其电网自动化的目的,在于提高运行可靠性,改善电能质量,改善劳动条件,保证人身和设备安全,进行优化调度,增加经济效益。发展中国家多采用手动或半自动监控。发达国家多采用自动监控、无人值班。中国近年来,做了许多试点研究工作,已有40多个地区和县的地方电网采用微机监控。

(6) 加强技术管理。在这方面,发展中国家与发达国家相比差距较大。例如中国,全国小水电平均年利用小时数为3118,地方电网平均线损达15%~20%。而一般水平,除预计担任峰荷的外,年利用小时数为4000 h以上,线损在7%~8%以下。

(唐仲南 朱效章)

xiejing kaiwa

斜井开挖 (inclined shaft excavation)

地下斜井开挖的施工过程。斜井开挖常应用于水电站通风井、出线井、排水井、压力管道、运输(交通)井以及为隧洞施工的斜支洞,一般用钻孔爆破法施工,有全断面开挖和反导井扩挖两种。

全断面开挖 自上而下独头掘进,用风钻或凿岩台车分段钻孔分段爆破,斜井口设转车场、提升设施和风、水、照明管线等,采用声光通讯联络,井内间隔一定距离设避炮洞,井侧有人行台阶和栏杆,工作面有防水和排水措施,爆破后的石渣用人力或耙斗装岩机装渣至箕斗,经卷扬机提升,通过井架转入斗车或梭式矿车出渣。对稳定性差的围岩要及时支护(见隧洞开挖)或边开挖边衬砌,适用于小断面斜井及倾角较小围岩比较稳定的斜井。

反导井扩挖 倾角较大且井下有通道的大断面斜井,视围岩稳定情况通常用自下而上打反井的方法开挖斜导井,而后再自上而下扩挖成斜井。斜导井断面较小,一般只有4~5 m²。反导井开挖方法有普通法、吊罐法和爬罐法三种,各种开挖方法同竖井开挖。在导井开挖后自上而下分段扩挖时,石渣用钢溜槽溜渣至井下通道出渣,必要时可在溜槽冲水润滑溜渣。在小型斜井当围岩稳定性较好时,导井开挖后也可采用溜渣

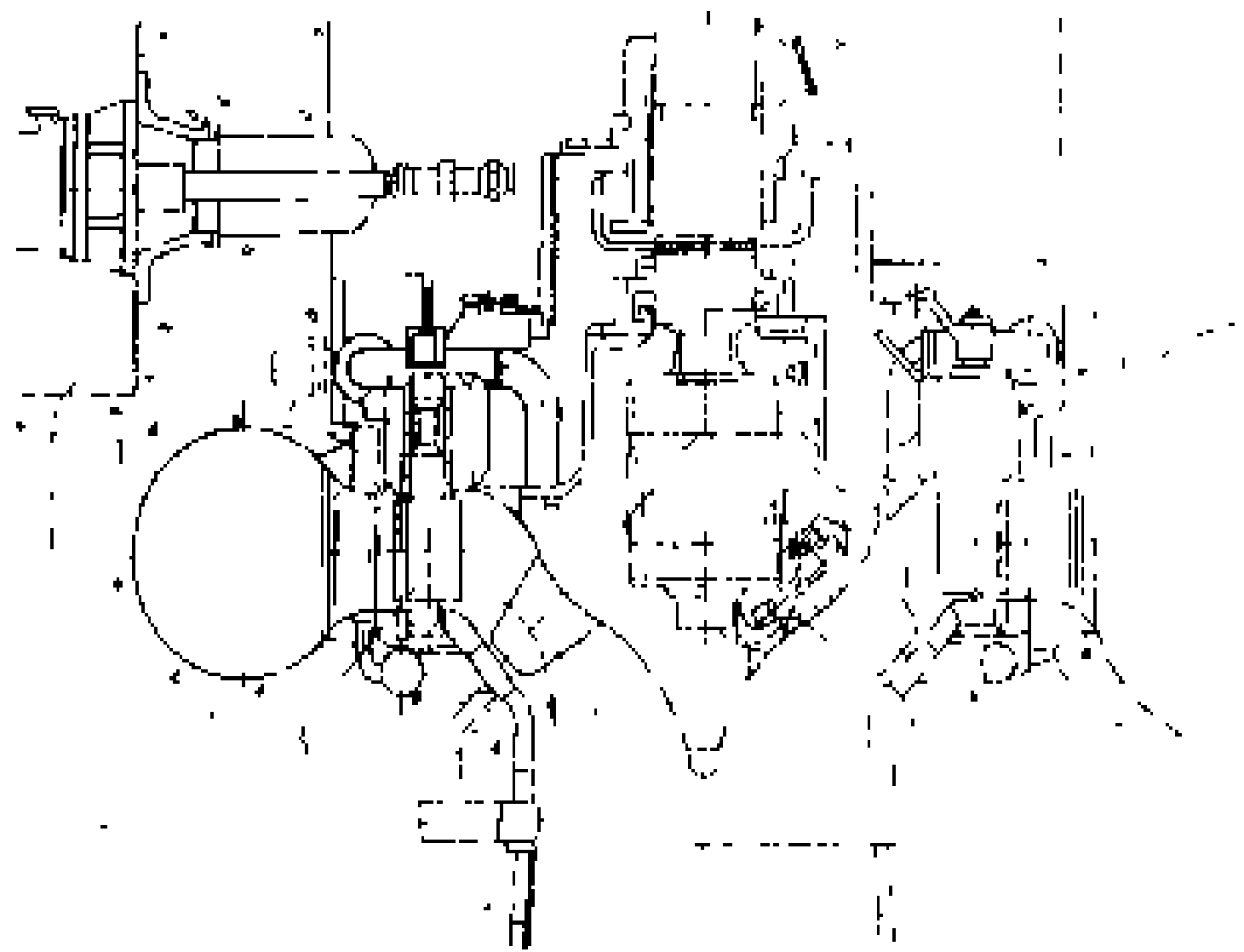
法澄渣钻孔爆破，自下而上扩挖。采用反导井扩挖时，支护必须及时，爆破前最末道支护距工作面的距离，一般不能太大。

(王守道)

xieliushi shuilunji

斜流式水轮机 (Deriaz turbine) 叶片的轴线与水流进入转轮的方向均倾斜于水轮机主轴的反击式水轮机，亦称对角式 (Diagonal) 水轮机。其使用水头范围为 25~200 m。

结构及其特点 斜流式水轮机是在轴流转桨式水轮机 (见轴流式水轮机) 的基础上发展起来的，主要部件有蜗壳、座环、导水机构、转轮室、叶片、转轮体、尾水管以及主轴 (见水轮机主轴) 等。蜗壳一般为钢制，圆形断面。转轮体和转轮室均为球形。叶片的数目一般为 8~12 个。叶片轴线与水轮机主轴轴线的交角为 45° ~ 60° 。叶片可以转动，其传动机构置于转轮体内。斜流式水轮机适应水头和负荷变化的能力较强，能在较宽的变化范围内保持高效率，但结构特别是叶片受力情况复杂，因而应用得不甚广泛。其结构见图，同时标示出了水流流向。



斜流式水轮机结构图

1—蜗壳；2—座环；3—导水机构；4—转轮室；5—叶片；
6—转轮体；7—尾水管；8—主轴

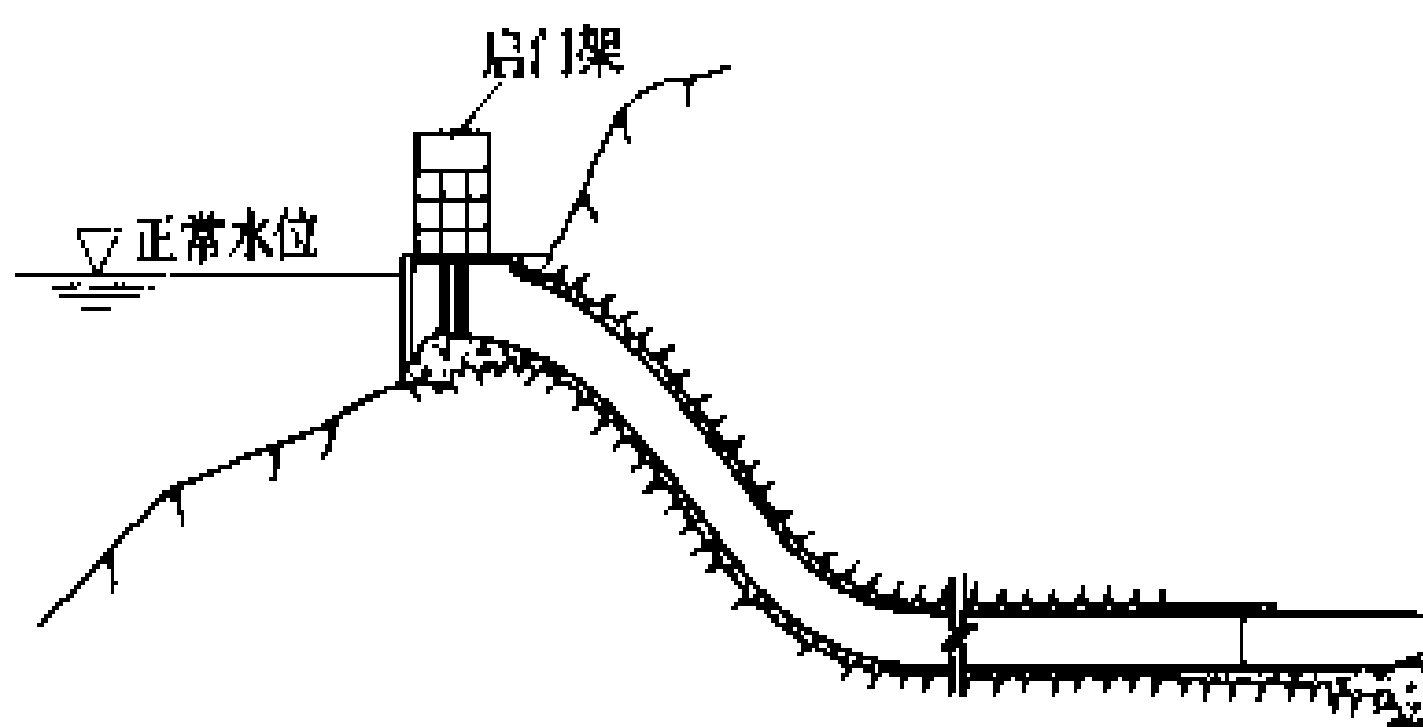
发展简史及现状 斜流式水轮机是轴流转桨式水轮机向更高水头发展的产物，是 20 世纪 50 年代才发展起来的一种新机型。1951~1952 年，英国电力公司的瑞士人 P. 德里亚 (P. Deriaz) 首次提出，因而也称为德里亚水轮机。该型水轮机在近年内虽有所发展，但应用并不广泛。目前，单机出力最大的斜流式水轮机是苏联的泽雅水电站 (Зейская ГЭС) 的水轮机，转轮直径为 6 m，使用水头 74.5~97.3 m，额定出力 215 MW；使用水头最高的是日本的高根 (Takane) 第一水电站，最高水头为 136 m。中国的第一台斜流式水轮机安装

在毛家村水电站 (以礼河一级)，单机额定出力 8.33 MW，转轮直径 1.6 m，电站运行水头为 27.5~77 m。

(史毓珍)

xiehong suidong

泄洪隧洞 (spillway tunnel) 通过隧洞，主要用于泄放洪水的泄水建筑物。其孔口位置可为表孔、中孔或深孔。根据其布置和隧洞内水流特点，可分为无压、有压及混合型三种类型，其建筑物由上游引水段、控制段、隧洞泄流段、消能工及下游退水渠组成，图所示为表孔泄洪隧洞。



泄洪隧洞布置图

上游引水段 是沟通水库和控制段之间的水道，其布置和体型应能使水流平顺地进入隧洞进口，防止进口流速分布不均或产生贯通的主轴漩涡，吸入空气，影响隧洞的过水能力和流态稳定。

控制段 是泄洪隧洞控制泄量的关键部位，无压泄洪隧洞控制段设在隧洞进口，有压泄洪隧洞控制段设在隧洞出口，混合型泄洪隧洞控制段设在隧洞中部。控制段设有工作闸门，工作闸门前为有压水流，工作闸门后为无压水流。为了获得最佳的压力分布和流量系数，闸门前应有一段喇叭口，工作闸门最好用弧形闸门以防止汽蚀破坏；工作闸门前设检修闸门，重要的工程宜在工作闸门前设事故闸门 (或事故检修门) 及检修闸门各一道。如采用平板闸门，门槽尺寸和形状应妥善设计，以免产生漩涡和汽蚀。闸门附近的衬护应选用耐泥沙磨损的材料。

隧洞泄流段 按不同的类型和水流特点，无压泄洪隧洞及混合型泄洪隧洞的无压段均要求平面布置呈直线，以保证隧洞内为稳定的无压水流，防止出现不利的冲击波。有压泄洪隧洞和混合型的闸前有压段可以布置成曲线，但其洞内流速和弯道曲率不宜太大。当河道地形适合时，多采用首部控制的直线无压泄洪隧洞。它具有泄流能力较大、水力学条件简单、隧洞衬护简化等优点。一般采用城门洞型的隧洞断面，采用混凝土衬护，表面力求平整，顶拱部分处于水面以上，当岩石较好时，也可采用简单的喷锚支护。当河道地形复杂，无法将泄洪隧洞的泄流段布置成直线时，可采用出口控



制的有压或中部控制的混合型泄洪隧洞。有压泄洪隧洞过流段需要承受内水压力并需防渗,因此造价较高。为改善衬砌受力条件,最好采用圆形断面,为此在和闸门连接处要设渐变段。

消能工 泄洪隧洞常用挑流鼻坎消能,挑坎尽量高出下游最高水位。当挑流水舌方向与下游河道呈一定交角时,应调整鼻坎体型使水舌顺河扩散,以减轻对下游河床及岸坡的冲刷。

下游退水渠 当下游采用底流消能时,则应有一段退水渠和河道相接,使水流顺利归槽。

(林可冀)

xiexiang zhamen

泄洪闸门 (flood discharge gate) 用以宣泄洪水并调节控制水库水位的工作闸门。它具有承受各种静、动载荷的能力;能在动水中启闭,并具备良好的结构和水力学特性。泄洪闸门的水流流态直接影响闸门运行的可靠性,在高速水流下,往往会引起闸门及其所在建筑物产生振动、空蚀、冲刷或加剧泥沙磨损等不良后果。因而对闸门的结构动力特性和水流流态应予以十分重视。

类型 泄洪闸门常用弧形闸门、平面闸门或锥形阀等。弧形闸门和平面闸门可布置在泄水建筑物的进口、中段或出口。弧形闸门在布置上一般不设门槽,水力学条件好,动水中操作时启闭力小,适于用作泄洪闸门。平面闸门一般指直升式平面闸门,其水力学特性比弧形闸门差,但在布置上比设置弧形闸门紧凑,同时闸门可提出门槽便于检修。在泄水建筑物的出口往往选用各类阀门,如锥形阀、针形阀、空注阀及高压闸阀等等,其中以锥形阀结构简单,便于制造,自重轻,并具有水力条件好和流量系数大等特点,常用于中、小水利水电工程泄水管道的出口。其他阀门因结构复杂,制造加工困难,造价高,较少采用。

泄洪闸门的水力学问题 一般弧形闸门在布置上由于没有门槽对水流的干扰,闸门水力学条件较好。对带有突扩门槽的弧形闸门,需考虑弧门启闭过程中的掺气、水翅及缝隙射水等水力学问题,对突扩门槽的体形及通气等设施,应进行水力模型试验验证确定。

平面闸门门槽的水力学条件较差,是产生空蚀的主要因素。要合理选择平面闸门门槽型式以防止门槽空蚀损害。水流空蚀数与反映门槽体形空蚀特性的初生空蚀数进行比较,作为判别所用门槽是否会发生空穴的条件。闸门底缘型式对闸下水流流态有一定影响,一般当底缘上游倾斜角为 $45^\circ\sim 60^\circ$ 时,在闸下自由出流及底缘水流不出现分离现象的条件下,底缘上游倾斜面上的上托力系数 β_1 较为稳定($\beta_1=0.7\sim 1.0$);下

游倾角大于或等于 30° 时,底缘下游通气充分,流态良好,可不计下吸力。

泄洪闸门的通气孔 在泄洪闸门门后应设置通气孔,供闸后水流补气或排气之用。这是保证闸门正常工作,改善水流流态,防止空蚀、振动,减小闸门启闭力的重要措施之一。门后水道因不设通气孔或其面积偏小或位置不当,都会造成闸门操作过程中的故障,影响安全运行,或加剧空蚀、振动等问题的发生。

闸门振动 水工闸门为一弹性系统,在动水及其他动力作用下,会使系统中任一构件的位移或应力产生随时间的往复变化,即为闸门振动现象。在一般情况下,闸门振动是轻微的,只有在某些特定条件下(如共振)才较严重。闸门振动的研究目前侧重于原型观测,探求其振源和振因,并采取相应的减振或防振措施。导致闸门振动的主要因素有:闸门某开度的水流条件不好、闸门结构的刚度不当、制造和安装精度不良、下游淹没水跃对闸门的冲击作用、止水漏水、门底缘型式不妥、通气孔面积不足、明满流交替水流及门顶门底同时过水不良作用等。

泄洪闸门的止水装置 平面泄洪闸门一般采用上游面止水,但因门叶及其支承结构承载后产生变位,易使上游面止水脱开而产生阵发性漏水,往往引起闸门振动,需采取措施防止。平面泄洪闸门如采用下游面止水,虽可获得较好的止水效果,但由于其底缘型式引起的水力设计比较复杂,启闭机的启门力或下压力较大,故较少采用。

弧形泄洪闸门的顶止水均位于上游面,因此也会发生平面泄洪闸门上游面止水的类似情况。高水头深孔弧形闸门承受巨大水压力后,因门叶及支臂等构件产生较大的径向压缩变形,为使顶止水不漏水,就需使止水具有大于闸门径向变形量的伸缩量。为解决这一问题,通常深孔弧形闸门的顶止水采用两道止水。近年又出现了如转轴式、压紧式、充压式等一些新型止水形式,以适应较大的闸门变形。为适应高水头弧形闸门局部开启泄洪的要求,一种压紧式止水的偏心铰弧形闸门已在许多国家采用。中国龙羊峡和东江两水电站上也已投入运用,运行情况良好。

(沈德民)

xieshui jianzhuwu

泄水建筑物 (water release structure)

为宣泄洪水或其他需要放水而设置的水工建筑物。泄水建筑物在水利、水电枢纽中的作用:①汛期泄放洪水,控制水库水位以保证挡水建筑物的安全。②按照合理的调度运行方式,在汛期控制下泄洪水流量以减轻下游洪水灾害;在非汛期有计划地放水,以保证下游通



航灌溉、工业和生活用水。③汛期排放泥沙,减轻水库淤积以延长水库有效库容的运行时间;在水库低水位时放水冲沙,降低进水口前淤沙高程,减少过机水流含沙量以减轻对水轮机的磨损。这种泄水建筑物又称排沙建筑物。④在维修大坝或紧急情况下放水降低库水位。⑤在多污物河流或寒冷地区利用开敞式泄水建筑物排放污物或冰凌以免除拦污栅被堵塞或破坏。⑥孔口高程较低的泄水建筑物还可参与冲沙和施工后期导流,同时也可向下游供水缩短截流之后下游河道断水的时间。泄水建筑物的规模和泄水能力应满足上述各项要求,并按工程的规模和重要性确定在各种控制水位时的泄水标准。

泄水建筑物由控制段、泄流段及消能设施组成。当泄水建筑物设置在岸边时,根据地形条件,有时需设上游引水渠和下游退水渠(图1)。控制段设有工作闸门

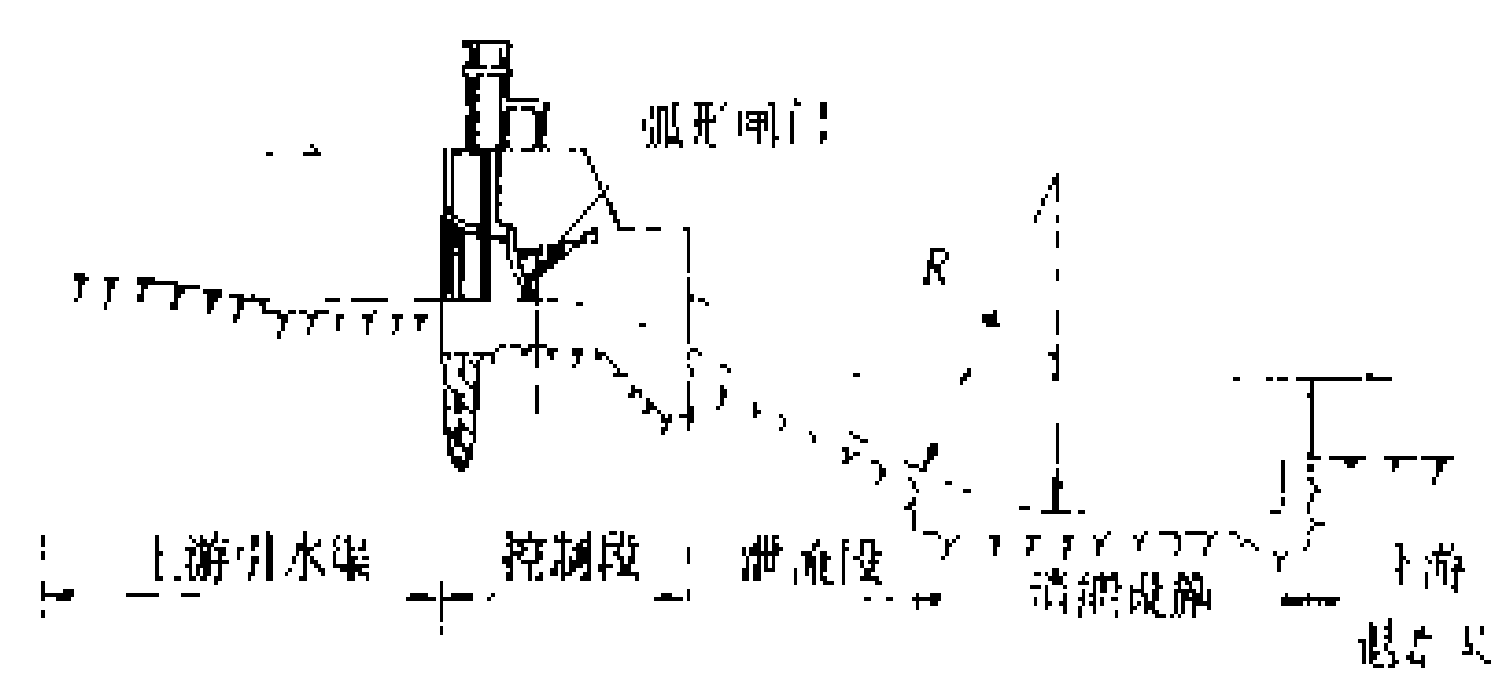


图1 泄水建筑物

和事故或检修闸门,用以控制水流的泄放或截断水流。泄流段将过闸水流送至消能设施前。消能设施也称消能工用以消耗泄流段尾端高速水流的能量,使下泄水流能安全地归入下游河道(或下游退水渠),减轻不利的河床冲刷和淤积。上游引水渠是水库和控制段之间的连接水道。下游退水渠是消能设施至下游河槽之间的连接水道。

通过泄水建筑物的水流具有很大的能量,属高速水流,需做好泄水建筑物的消能防冲、防空蚀及防磨损设计。

泄水建筑物的类型 根据其在枢纽中的位置和建筑物的特点有:溢流坝、滑雪道式溢洪道(图2)、岸边溢洪道、泄洪隧洞、坝身泄水孔、泄水闸等。广义地讲,溢流坝、滑雪道式溢洪道、岸边溢洪道和设表孔的泄洪隧洞可统称溢洪道。滑雪道式溢洪道是岸边溢洪道的一种特殊布置。它布置在岸边,但较岸边溢洪道更靠近河岸,其首部控制段大多布置在岸边坝段上,泄流段和消能设施则顺坝下游面至岸边,结合岸边地形布置于高出地面的排架结构或实体混凝土之上,类似一个高台滑雪跳板,因而得名。这种溢洪道可以把挑流水舌送到距坝趾较远的下游河道中,对消能防冲有利,因而常在工程中采用。按泄水建筑物的孔口设置高程有:表孔泄水建筑物、中孔泄水建筑物和深孔(或称底孔)

泄水建筑物。表孔泄水建筑物的泄水孔口设于库水位的表部,由闸门或闸门及胸墙挡水,主要用于泄放洪

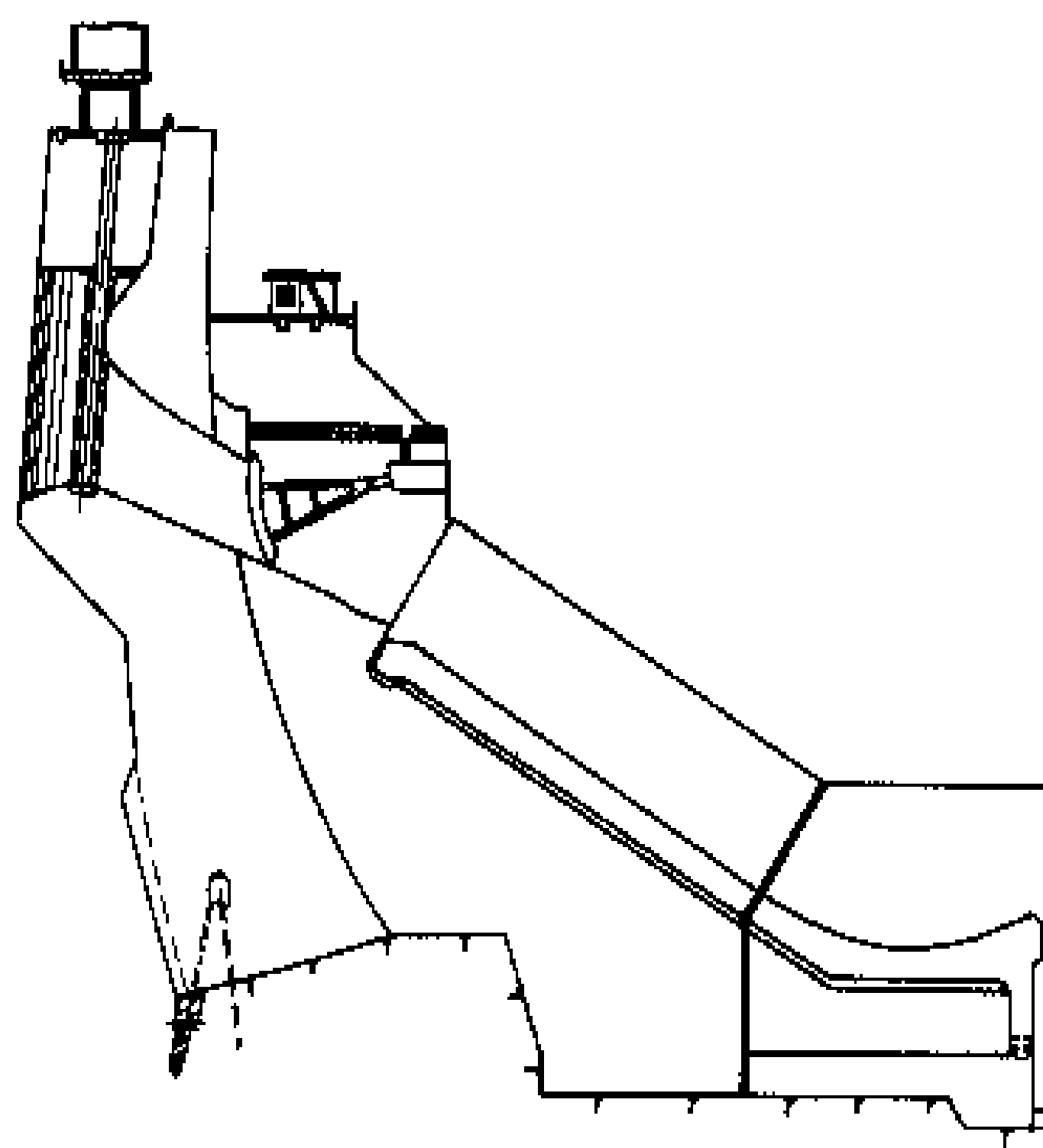


图2 滑雪道式溢洪道

水,其泄水能力较大,随水位升高,泄量增加多,即具有较大的超泄能力;中孔和深孔泄水建筑物的泄水孔口分别设于水库水下中部和深部,它有利于放低库水位和排沙等,但其超泄能力小。

为节省工程造价或受布置泄水建筑物的位置限制,有些工程将用于宣泄洪水的泄水建筑物分为正常和非常两种,正常泄洪建筑物用以宣泄设计标准以下的洪水,非常泄洪建筑物在超过设计洪水情况下,参与泄洪,其结构和消能防冲设施的设计标准可降低一些。

泄水建筑物的消能防冲 在泄水建筑物的尾端需设置消能设施,以消散部分或大部分水流的动能,使之在较短距离内与下游河道水流平顺衔接,从而减轻对下游河床及岸坡的冲刷,保证工程的安全。消能工布置大都经水工模型试验验证后拟定。消能的基本原理是依靠水股之间、水与固体边界之间和水与空气之间的相互撞击、掺混以及水流内部的旋滚和紊动等作用来消除所含的动能,使水流从急流过渡到缓流。消能方式按水流条件可分为底流消能、挑流消能和面流消能三种,相应的建筑物为消力池、挑流鼻坎及水垫塘、消力岸和面流坎等,见图3。

(1) 底流消能。水流以底部急流方式进入消力池,遇足够深度的尾水顶托发生水跃消能(见水跃)。底流消能能适应变幅较大的尾水位,消能效果较好。一般广泛用于中低水头工程。对高水头、大单宽流量工程,因要求消力池尺寸很大,造价较高,采用较少。

(2) 挑流消能。在泄水建筑物末端设挑流鼻坎,使急流水流向下挑射,通过射流在空中的扩散、紊动和掺气作用,消除部分能量,然后跌落到离鼻坎较远的河槽中,在冲刷坑和一定的尾水深度所形成的水垫中消

能。挑流消能充分利用了天然河床岩石的抗冲刷能力，

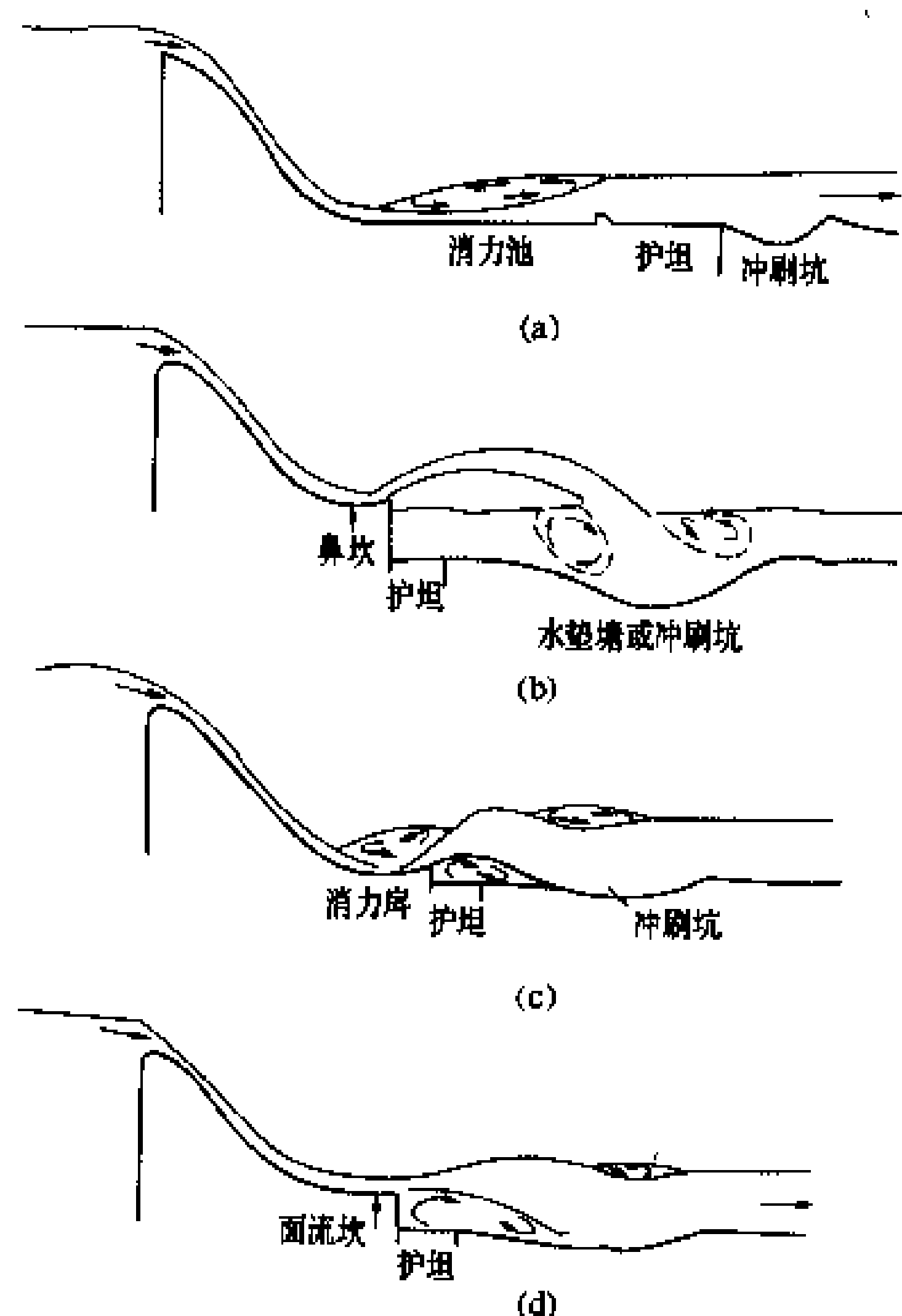


图3 消能方式示意图

(a) 底流消能 (消力池); (b) 挑流消能 (挑流鼻坎);
(c) 面流消能 (消力库); (d) 面流消能 (面流坎)

是一种经济的消能方式，多用于高水头泄水建筑物。在地质条件较差(河床基岩不耐冲刷)或下游水垫深度不够时，可设二道坎或预挖水垫塘以增加水垫深度，减轻近坝冲刷。挑流消能将在下游造成溅水和雾化，因此，厂房和送变电设备应避开溅水和强雾化区或采取防护措施。

(3) 面流消能。有两种形式，一种在泄水建筑物尾端设置戽斗，使水流在戽斗内产生强迫旋滚，出戽水流形成一个涌浪并伴随一个底旋滚和一个下游表面旋滚而消能(见消力库);另一种在泄水建筑物尾端建垂直陡坎(面流坎)，使高速水流保持在表面，利用其下部较长的底旋滚消能。后一种消能方式有利于下放漂木。这两种面流消能布置所产生的冲刷坑均距泄水建筑物有一定距离，有利于建筑物安全，但流速较高的面流和波浪延续的距离较长，易引起对下游岸坡的冲刷。对尾水位变幅要求严格、在高坝工程或尾水位变化较大时，因难以维持戽面流的流态，易于使坝趾附近的河床受到冲刷，均不宜采用。

泄水建筑物的防空蚀 为使泄水建筑物免受高速水流的空蚀破坏，采用的措施有：①优化泄水建筑物的过水面体型，力求光滑平顺并与水流流线吻合，以免产生负压或局部漩涡等现象。合适的体型常通过水工模

型试验和已成工程类比拟定。②控制泄水建筑物表面的施工不平整度，防止高速水流经过壁面时出现绕流和分离，形成负压引起空蚀破坏。③采用抗空蚀性能较高的材料，常用的方法是提高混凝土标号，也可用表面真空模板和涂抹表面抗蚀材料等。④掺气措施指水面自然掺气以外的人工掺气措施，即向高速水流底部人工掺气，这一措施是抗空蚀技术在近30年来的新发展。随着高水头泄水建筑物的兴建，对溢流表面平整度的要求也愈来愈严格，施工往往难以满足要求。根据工程实践和室内试验研究，证明在泄水建筑物上采取向水流底部掺气可以避免或减轻空蚀破坏，临底水流掺气量达3%~4%时(气比水)即可大大减弱空蚀破坏，当达到7%~8%时，可以完全免除空蚀破坏。常用的掺气型式见图4。

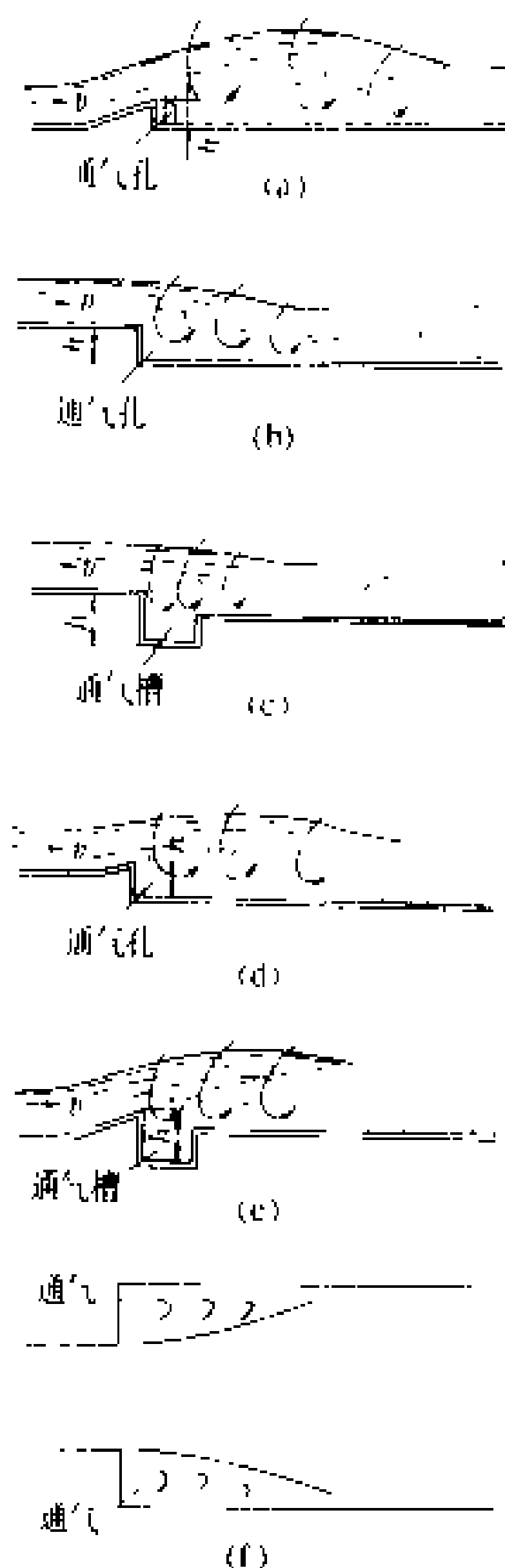


图4 常用的掺气型式示意图

(a) 挑坎式; (b) 跌坎式; (c) 跌空槽式; (d) 挑跌坎式; (e) 槽坎联立式; (f) 平面突扩式

全免除空蚀破坏。常用的掺气型式见图4。

在工程中最先采用掺气措施的是美国。美国垦务局于40年代开始研究，到1960年大古力坝泄水孔遭受空蚀破坏后初次应用通气槽掺气措施取得成功。采用这一技术措施可以适当降低对过水表面施工平整度的要求，同时也可避免使用价值昂贵的护面材料，具有经济效益。

泄水建筑物的防磨损 在多沙河流上的泄水建筑物，经长期运用，将受到高速含沙水流(包括河床推移质)的严重磨损。泥沙磨损分推移质磨损和悬移质磨损两类。推移质磨损多发生在山区河流，粒径大的石砾在水流中的滑动、滚动和跳动的方式运动，对泄水建筑物产生撞击和磨损破坏。悬移质磨损是指在高速水流的紊动作用下，小颗粒泥沙和水混合，形成挟沙水流，当通过建筑物时，造成表面磨损。防治的办法主要是提高材料的抗磨能力，如采用高强度混凝土。另外也有采用高强耐磨护面材料，如钢板、水泥石英砂浆、环氧砂浆、呋喃砂浆、铸石护面等。对于推移质磨损严重的地方采



用钢轨铸石砖组合材料护面效果很好,近年来发展的硅粉混凝土具有抗磨能力强、造价低、施工较简单的优点,已在工程中应用。

(林可冀)

xieshui jianzhuwu weixiu

泄水建筑物维修 (maintenance and repair of water release structure)

为保证水利水电枢纽中泄水建筑物安全和正常运行而对其损坏部位进行维护、修复或改建的工程措施。泄水建筑物包括溢流坝、溢洪道、泄洪隧洞、泄水底孔、泄水闸等,一般用混凝土或钢筋混凝土建成,是保证水利水电枢纽及其上下游安全的一种重要水工建筑物。在宣泄水流时,泄水建筑物表面及上下游都受到高速水流及其挟带的泥沙、冰凌、漂浮物等的作用,可能发生空蚀、磨蚀、冲刷等破坏,湍流及动水压力的作用也不容忽视。它还受到干湿、冷热、冻融、胀缩以及化学变化等风化因子而造成损坏。对受到损坏的泄水建筑物除按一般混凝土结构所采用的方法进行处理和修复(见大坝维修)外,还应针对其特点及工程具体情况,消除可能造成破坏的潜在因素,采取适当砌护措施,强化其本身的防御能力,以确保其本身以至整个水利枢纽的安全和正常运行。

空蚀破坏的维修 泄水建筑物常因体形不合适或表面不平整而在高速水流作用下发生空蚀而导致混凝土表面的损坏。其处理措施主要是消除或减轻导致空蚀的因素,选用抗空蚀性能好的砌护材料,以及采取掺气减蚀措施等。

(1)通过水工模型试验,对泄水建筑物过流部位的体形及结构形式进行适当选择,尽量采用流线型,避免表面的突变。对混凝土表面的突体要一一处理,予以铲除或研磨成一定斜度的坡面,达到一定的不平整度要求。水流边界越平顺,越不容易发生空穴和空蚀。提高边界上的压强,也是避免空蚀的有效措施,如缩小有压流的出口断面,以提高孔洞内壁上的压强等。

(2)选用抗空蚀性能好的材料砌护过流边界表面,以增强其自身抗空蚀能力。水工混凝土的抗压强度与抗空蚀能力成正比,选用高标号混凝土就可以提高抗空蚀能力。近代用钢纤维混凝土、聚合物砂浆或混凝土、硅粉混凝土等修复空蚀破坏区,效果很好。钢板是较好的抗空蚀材料,尤其是不锈钢板效果更好,也常用于砌护可能发生空蚀的区域。

(3)掺气减蚀。在水流边界上掺气,也是防止空蚀的有效措施,在20世纪70年代以后已被广泛采用。泄槽内水深较小时,可以从表面得到自然掺气。如不能满足自然掺气条件时,就要采用挑坎、跌坎、通气槽、侧

向突扩、分流墩等工程设施,使水流与边界分离,形成空腔而从水流底部吸入空气,达到掺气减蚀的目的。一般水流底层掺气1.5%~2.5%就能减轻混凝土空蚀,掺气达7.0%以上时可完全消除空蚀。

磨蚀破坏的维修 泄水建筑物的过流表面受到挟带悬移质泥沙或推移质泥沙的水流以及漂浮物的撞击和磨损,可以使混凝土表面变得粗糙不平整,露出粗骨料,乃至使钢筋折断,造成整个结构的严重破坏。需从减少磨蚀介质来源,减小旋滚水流及采用抗磨材料砌护等方面进行处

(1)尽量减小磨蚀介质的来源,如清除施工时遗留的碴料,对明确的产砂地区采取水土保持措施,在进水口上游设置拦截漂浮物的设施等。

(2)改善水流流态,避免回流带动砂石杂物反复旋滚面造成的磨损,将消力池内残留的砂石铁件等杂物清除干净,以减小磨蚀。

(3)采取防护措施。对以悬移质泥沙为主的挟砂水流,可用高标号砂浆或混凝土进行修补;对高速挟沙水流可用聚合物砂浆或混凝土做面层,以提高其抗冲刷能力。对大颗粒推移质泥沙造成的撞击磨蚀,要采用花岗石、条石、卵石等材料砌护,并用砂浆勾缝。在严重情况下,要用钢轨、铸铁板、辉绿岩铸石等材料砌护,有的工程采用钢轨中间镶铸石板或条石的方法砌护,将钢轨的抗撞击和铸石的耐磨结合起来,效果良好。

冲刷破坏的维修 高流速、大流量水流下泄时,水流能量集中,如消能防冲措施不完善或管理运用不当,均可造成过流面、消能工及下游河床、岸坡或坝趾的冲刷或淘刷破坏,有时可造成严重后果。必须改善水流条件,改进消能防冲设施,修复破坏部位,加强砌护结构,以避免其冲刷破坏。

(1)改善水流流态。通过水工模型试验,对泄水建筑物进口段、泄槽段及出口段的水流冲刷情况进行研究,并采取改进措施。如进口段引渠的行近流速要控制在容许范围以内,否则就要加以砌护,并防止对两岸岸坡的冲刷或回流淘刷。对泄槽段要防止形成冲击坡和横向比降,或水流漫过边墙而冲刷边墙基础。对出口段的消能防冲措施要研究改进,甚至改建,以减少冲刷潜势,并研究冲刷坑深度及范围、回流淘刷的可能性,为加强砌护提供依据。

(2)防止下游冲刷的危害性发展。如冲坑太深后削弱基岩的抗力体作用,影响大坝或岸坡的稳定;回流淘刷岸坡坡脚、鼻坎基础,而造成岸坡或鼻坎的失稳;消力池长度和深度不够而出现远驱式水跃,冲刷下游河床;水流直冲岸坡等。要做防冲齿墙、修建二道坝以提高尾水水深,对岸坡进行砌护、利用鼻坎使水流归槽、



用导流墙隔流墩等设施导引水流以避免回流、在消力池下游设海漫、护坦和防冲槽等辅助防冲设施等。

渗流和动水压力 要确定泄水建筑物地区的渗流场，并据以确定作用在建筑物底部及侧墙上的扬压力或静水压力，如影响到建筑物稳定性时，要作防渗或排水处理，以降低渗水压力。有时泄槽内的底板不平整，形成下游高出上游的错台现象，接缝中未设止水，底板下也没有可靠的排水系统，在高速水流通过而受阻，流速水头转化为压力水头，作用在混凝土底板之下，可将整个底板掀翻，并使基岩受到冲刷破坏，这时要重浇底板，缝间设止水，底板下设有有效的排水系统，使解除形成动水压力的可能性。

(蒋国澄)

xieshui jianzhuwu yuanyxing guance

泄水建筑物原型观测 (prototype observation for water release structure) 通过埋设在泄水建筑物内部或表面的各种仪器，对泄洪运行期间的工作状态、泄流情况及过流引起的其他现象进行原型观测的技术。当泄水建筑物开始运行之后，其温度、应力、沉降、位移及渗流量等都在不断变化，当泄流时由于水流作用引起的建筑物振动、空蚀、磨损及水流对下游河床的冲刷等，都关系到建筑物的安全。通过原型观测可以及时掌握各种现象的变化，发现和预报可能发生的问題，以便采用合理措施，制订正确的管理运行准则，保证工程的安全运行。同时原型观测可以得到室内试验所得不到的资料，以验证设计理论的可靠性，提高理论水平。

内容 主要有两大部分：一部分是建筑物本身的变化，包括坝体温度、内部应力、坝顶沉降、坝体位移、渗流量等。这些都属于水工建筑物原型观测的内容。另一部分是泄流流态、流速、流量、压力等水力要素的量测，这主要涉及高速水流引起的建筑物振动、水流脉动、空化与空蚀、泥沙磨损、水流掺气、雾化及水流对下游河床冲刷的观测（见水力要素量测）。

方法与仪器设备

(1) 水流流态观测，主要量测泄水时上下游水流平面形态、水面线、水跃位置和尺寸、挑射水舌的轮廓及射程等。以目测为主，并用水尺、皮尺、经纬仪及照相经纬仪观测。

(2) 高速水流的压力脉动、振动、掺气、空化及冲击波的观测。这都要在过流表面预埋仪器底座，泄流前

将脉动压力感应器、振动加速度仪、掺气浓度仪、空化噪声仪等安装在测点上，用导线引入观测室，由示波仪或磁带记录器接收，再按要求将资料整理成有用成果。对空蚀及泥沙磨损的观测，要待停止泄流以后量测其冲蚀体积并换算成重量。在高速水流观测中，还常配以高速摄影机、摄相机等，记录一些无法用仪器直接观测的现象。

(3) 水流对下游河道影响的观测，主要包括下游河道中水面波动、下游河床和岸边的冲刷程度、冲坑的位置、深度、形状以及淤积物的堆积位置等。工程竣工后在未投入运行前，要先量测一次地形，以后每次泄水后都要量测一次，将逐次复测结果整理绘于同一图中，从中掌握其冲刷过程和冲刷稳定的时间。量测的方法可用花杆、测锤在船上进行，或超声波水下测深仪进行。在下游无水或水很浅的情况下，也可以用测量仪器直接量测地形。

原型观测技术的发展 对于泄水情况及高速水流的观测，中国始于50年代初期，当时以闸门启闭力、泄流状态、冲刷情况的观测为主。近期各大中型工程大都进行了较全面观测，其内容扩大到脉动、振动、雾化、掺气及空蚀等。作为水力学原型观测基地的乌江渡水电站，所进行的观测工作是最为全面的。国外如苏联、日本、法国等开展泄洪原型观测也较早。

参考书目

松辽水利委员会科学研究所等编，水工建筑物水力学原型观测，北京：水利电力出版社，1988

(李桂芬)

xieshuizha

泄水闸 (sluice barrage) 主要用闸门挡水的低水头泄水建筑物。由闸室和上下游连接段组成，见图1。闸室是泄水闸的主体，设有闸门。上游连接段的

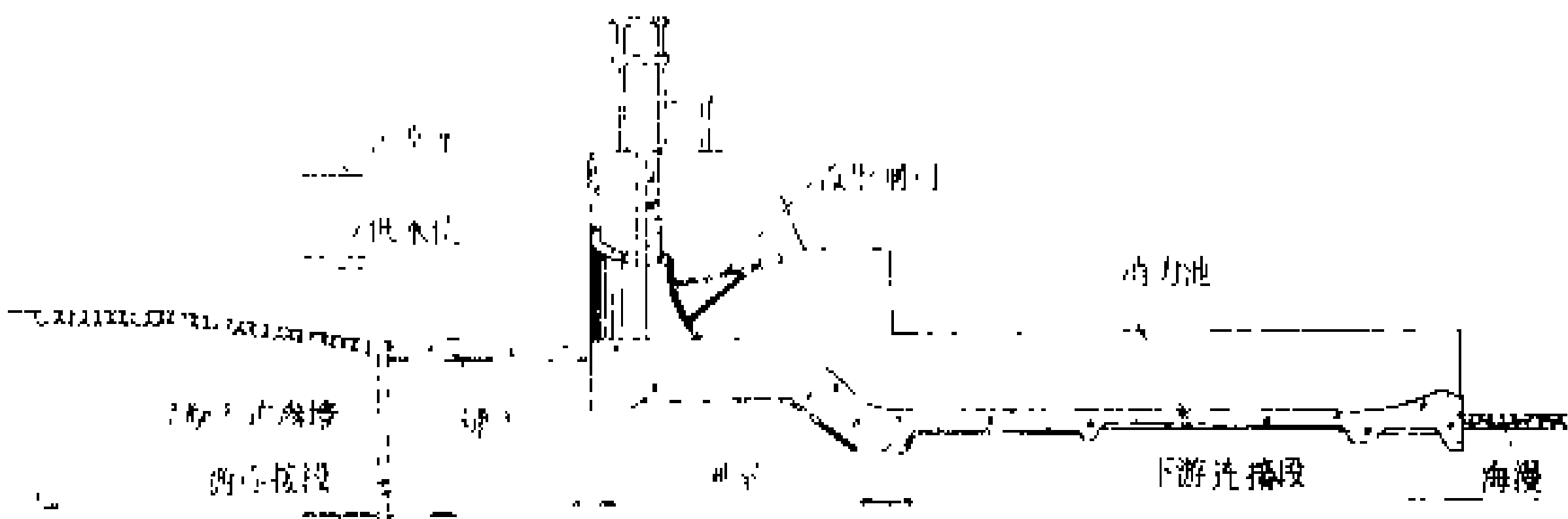


图1 泄水闸的组成

主要作用是引导水流均匀进闸；下游连接段的主要作用是消能防冲，引导水流安全排入下游河道。

泄水闸按其结构布置分为开敞式和涵洞式两种，见图2。涵洞式泄水闸一般建在堤坝之下，开敞式泄水闸本身即为挡水建筑物。泄水闸按其功用可分为：节制

闸、泄洪闸、排水闸、冲砂闸等。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 10480 km²，

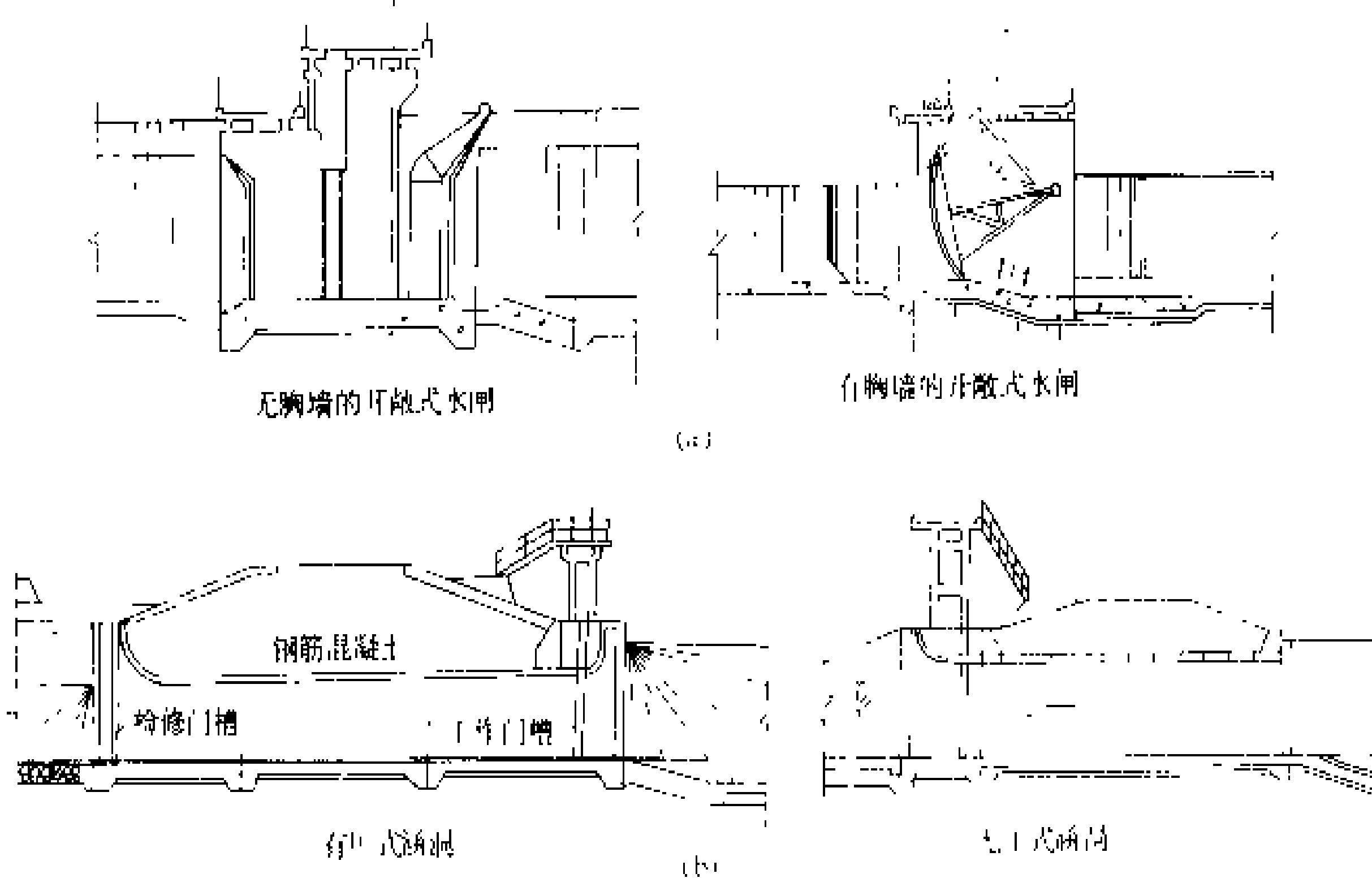


图2 开敞式和涵洞式的闸室布置
(a) 开敞式泄水闸；(b) 涵洞式泄水闸

泄水闸应尽量布置在河道中泓线上。闸墩轮廓尺寸要符合流线，减少侧向收缩影响，以提高泄流能力。闸室一般用宽顶堰或低槛实用堰。开敞式泄水闸堰顶设闸门，闸门顶与上游正常库水位齐平，也可在闸门顶以上设一段短胸墙以减少闸门尺寸。

闸室为挡水建筑物，在设计荷载作用下应整体稳定，应力应在容许范围内。闸室基础应采取防渗和排水措施。软基上的闸室应注意满足地基的承载能力，必要时进行加固处理。闸室可以是在闸墩分缝的整体结构，也可以是在闸墩两侧分缝的分离式结构。分缝中应设止水。

闸室下游连接段设消力池和防冲海漫，设计应考虑可能出现的最不利的水力条件以选定消力池的型式和尺寸。

(林可冀)

Xin'anjiang Shuidianzhan

新安江水电站 (Xin'anjiang Hydropower Station) 位于钱塘江支流新安江上，浙江省建德县境内，由中国自己设计、施工，自制设备，自行安装的第一座大型水电工程。电站以发电为主，兼有防洪、灌溉、航运等综合利用效益。电站装机容量 662.5 MW，保证出力 178 MW，多年平均年发电量 18.6 亿 kW·h，以 220 kV 和 110 kV 高压输电线路各 4 回接入华东电力系统。大坝为混凝土宽缝重力坝，最大坝高 105 m，工程于 1957 年 4 月开工，1960 年 4 月第一台机组发电，1978 年最后一台机组投运。(参见彩图插页第 11 页 16 图)

枢纽布置 见图。坝址地基为泥盆系砂岩和下石炭系石英砂岩，断层、裂隙较发育。大坝坝顶高程 115 m，坝顶长 465.4 m。

厂房为坝后厂顶溢流式。厂房顶部与拦河坝连接，厂房下部与拦河坝用垂直缝分开，厂房全长 216.1 m。副厂房布置在坝体与主厂房之间。110 kV 和 220 kV 开关站均布置在大坝下游右岸山坡上。升船机位于左岸，升船机进口闸首建成后即停建。厂房内安装 9 台竖轴混流式水轮发电机组，4 台单机容量 75 MW，5 台单机容量 72.5 MW。水轮机转轮名义直径均为 4.1 m，额定转速 150 r/min。发电机额定电压 13.8 kV，除 9 号机为双水内冷式外，其余 8 台均为悬式空冷型。

溢洪道位于拦河坝河床部分坝后厂房的顶部，设 9 个表孔，孔口宽 13 m，高 10.5 m。闸门为平面定轮闸门。堰顶高程 99 m，最大泄流量 13200 m³/s。下泄的高速水流通过厂房顶部泄入河道。

工程量、工期和造价 主要工程量为：土石方开挖 586 万 m³，混凝土浇筑 176 万 m³。混凝土最大日浇筑量达 9000 m³，最高月浇筑量 14 万 m³。工程开工到第一台机组发电，工期仅 3 年。工程实际造价 3.92 亿元，单位千瓦造价 591.7 元。

运行效益 新安江水电站是华东电力系统主要调峰、调频和事故备用电源。至 1990 年底，累计发电 430.21 亿 kW·h，总产值达 27.05 亿元，为电站总造价 3.92 亿元的 6.9 倍。

遭遇二十年一遇到千年一遇洪水情况下，经水库调节可以削减洪峰流量 22%~28%，免除或减轻下游建德、桐庐、富阳等城镇和 30 万亩农田的洪水灾害。

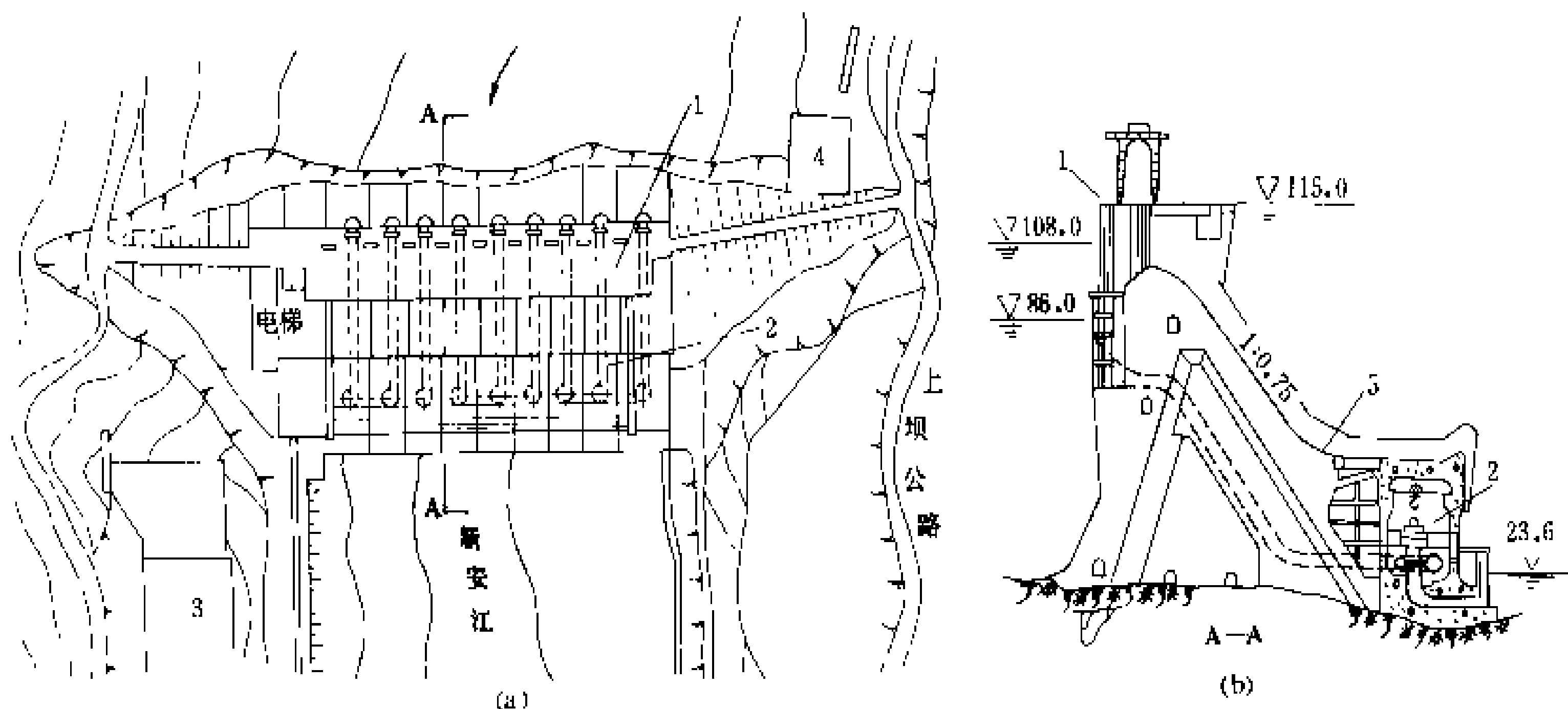
1960~1988年已拦蓄大于 $10000\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪水11次,减轻直接经济损失1.1亿元以上。

水库上游形成110 km的深水航道,轮船可由大坝直航安徽歙县。下游增加枯水期流量,航道得到改善,如坝址至梅城航段,建库前只能通小木船,现可行机动

船。

广阔水域为发展水产养殖事业提供了良好的条件。目前,鱼产量达每年3500~4000 t,比建库前增加35倍以上。

库区小气候有所改善,极端最低温度提高,极端最



新安江水电站枢纽平面布置及溢流坝剖面图

(a) 枢纽平面布置; (b) 溢流坝剖面图 (A—A)

1—大坝; 2—厂房; 3—高压开关站; 4—升船机闸首; 5—溢洪道

高温度降低,无霜期从238天延长到263.2天,有利于马尾松、柑桔、桑树等的种植。

水库形成“千岛之湖”成为驰名的旅游胜地。

设计和施工单位 上海勘测设计院设计,水利电力部第十二工程局施工。

(杨金株)

Xin Aodili Suidong Shigongfa

新奥地利隧洞施工法 (New Austrian Tunnelling Method, NATM) 在隧洞开挖中有效地利用围岩固有承载能力,及时形成环状承载结构为目的隧洞设计施工方法,简称新奥法。

新奥法的原理 掌握最佳支护(见隧洞开挖)时机,在隧洞开挖后岩体松弛前,让围岩产生一定量变形,但又不致发展到有害程度之时,就用喷混凝土等措施加以支护,使围岩形成一层环形柔性薄壁支护结构,如遇过大的围岩压力,则增加锚杆加固,使围岩与支护紧密结合,构成一个整体的承载环。新奥法虽然还没有完整严密的理论叙述,但其主要内容是:①它的理论建立在岩石力学基础上,并考虑了围岩在隧洞开挖时的空间和时间效应。②在设计上把支护与围岩作为整体看待,充分发挥围岩的自身承载能力,并以围岩起主导作用作为选择支护型式的依据。③在施工中尽量保持围岩原有强度。

岩体破坏,是在岩层应力(压应力、拉应力或剪切

应力)超过极限强度后出现的现象。隧洞开挖中围岩应力的大小除与岩性有关外,还受洞线走向、洞室断面、开挖方法、支护措施以及支护时间的影响,只要支护及时,措施得当,多数围岩即使是不良地质构造的破碎地段,也具有一定承载能力。

新奥法的三个支柱 喷混凝土、锚杆支护和现场量测称为新奥法的三大支柱。它除能发挥喷混凝土和锚杆支护的优越性外,又能通过量测手段修改设计、施工和监测围岩应力状况及时预先报警。喷混凝土支护是新奥法最常用的手段,它既有一定刚度,能限制围岩变形的自由发展,又有一定柔性适应围岩一定量变形。喷混凝土与围岩造成的承载环,在受剪力状态下工作,除能充分发挥围岩的承载潜力外,在与围岩同步变形的同时,还可形成一定反力提高围岩强度,有助于维护围岩稳定。锚杆是在围岩压力过大时进行的二次加固支护。隧洞开挖后的最佳支护时机和是否需要二次支护,均需通过现场量测,观察围岩变位的收敛程度后决定。

新奥法的优点 ①维护围岩稳定、保证施工安全。②充分利用围岩的自身承载能力,降低了对支护结构的要求。③锚喷支护适应性强,施工速度快,有利于洞内各工序之间的平行流水作业。④根据现场量测预报,随时调整设计和施工方案。⑤与传统的隧洞设计施工方法相比,节约材料,减少开挖量,降低工程造价。

新奥法是1948年奥地利岩土力学家L. V. 拉布采



维兹(L. V. Rabcewicz)提出的, 1962年在萨尔茨堡(Salzburg)召开的第八届国际土力学会议上正式通过。1964年11月L. V. 拉布采维兹发表第一篇关于新奥法的论文, 但它的理论和实践总结还停留在不系统和片断资料状态, 直到1975年才提出“新奥法”的综合介绍。当时这个命名还没有成为国际上通用的学术用语。如1978年10月在由法国隧洞技术协会召开的加固隧洞会议上称为“收敛约束法(convergence-confinement method)”。1979年在美国亚特兰大(Atlanta)召开的隧洞快速掘进会议上称为“欧洲隧洞掘进法(Europe tunnelling method)”。直至20世纪80年代, 新奥法的名称在国际上才逐渐统一, 并在各国地下工程设计施工中得到迅速发展。

(王守道)

Xinfengjiang Shuidianzhan

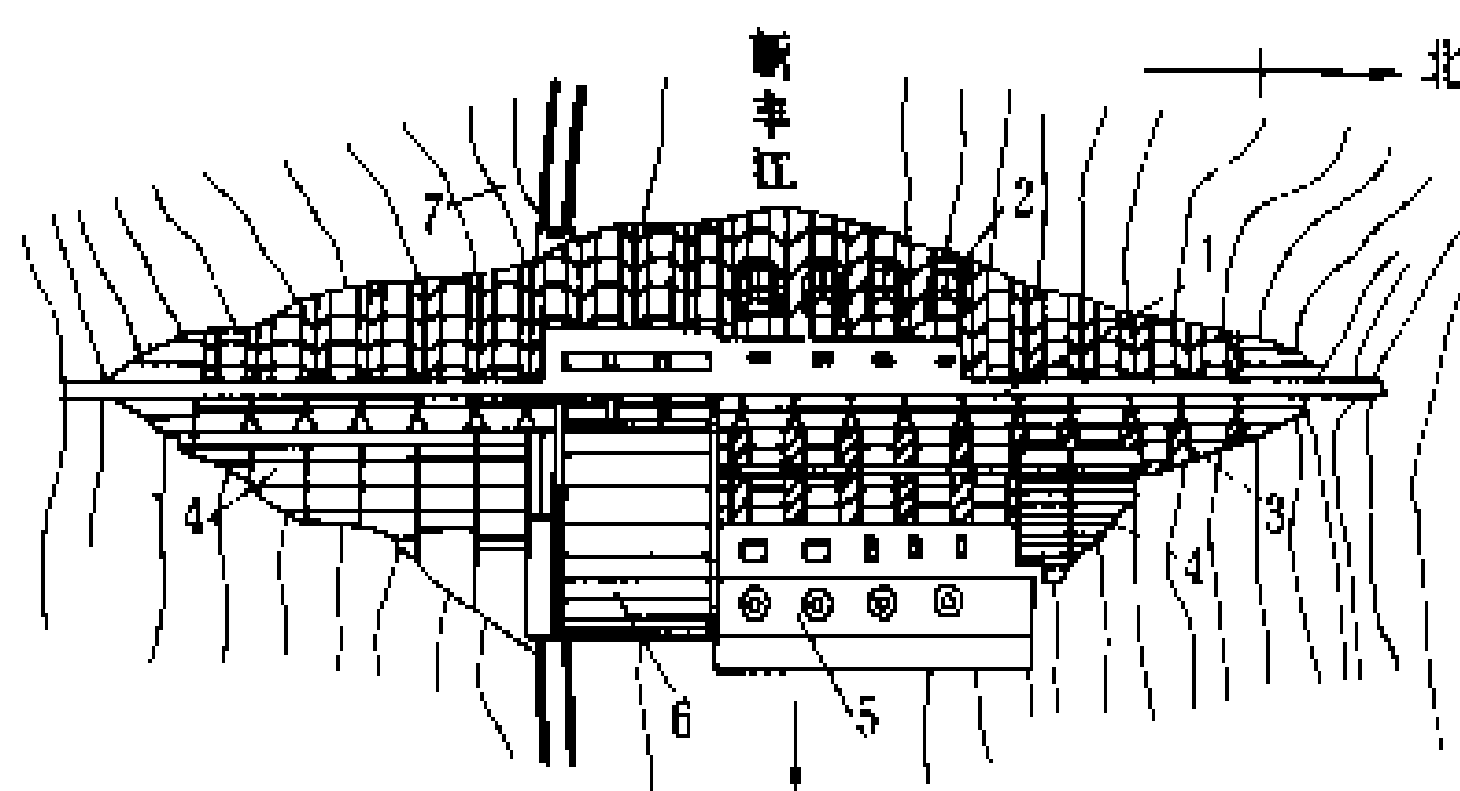
新丰江水电站 (Xinfengjiang Hydropower Station) 位于东江支流新丰江上, 广东省河源县境内, 距广州市200 km, 以发电为主, 兼有防洪、灌溉、改善航运等综合利用效益。据1984年水利电力部生产司资料, 装机容量302.5 MW, 保证出力99.9 MW, 多年平均年发电量9.9亿 kW·h, 以220 kV和110 kV输电线向华南电力系统供电。大坝为混凝土单支墩大头坝, 坝顶高程124m, 最大坝高105 m, 工程于1958年7月开工, 1960年第一台机组发电, 1962年竣工。

水文和水库特性 坝址以上流域面积5740 km², 多年平均年径流量65.6亿 m³, 多年平均流量208 m³/s。水库正常蓄水位116 m, 死水位93 m, 总库容138.96亿 m³, 调节库容64.89亿 m³, 为多年调节水库。大坝按千年一遇洪水设计, 万年一遇洪水校核。设计洪水流量10300 m³/s, 相应水位121.6 m; 校核洪水流量12700 m³/s, 相应水位123.6 m。电站最大水头81 m, 最小水头58 m, 设计水头73 m。

枢纽布置 大坝座落在燕山三期花岗岩上。坝顶长度440 m, 左右岸各布置3个混凝土重力坝段, 中间共有单支墩大头坝段19个。其中1~5号和14~19号坝段分别为左右岸非溢流坝段, 6~9号为电站厂房坝段, 10~13号为溢流坝段。见图。

厂房为坝后式布置, 厂内安装4台竖轴混流式水轮发电机组, 1~3号机单机容量为72.5 MW, 4号机为85 MW。水轮机转轮直径均为4.1 m。1~3号机额定转速为150 r/min, 4号机为136.4 r/min。发电机均为悬式空冷型, 额定电压13.8 kV, 定子铁芯内径8.54 m。220 kV屋外开关站布置在大坝下游距厂房1.5 km处。

泄洪设施 溢流坝段设有3孔表面式溢洪道, 孔口宽15 m, 高10 m。堰顶高程111.56 m, 每孔最大



新丰江水电站枢纽平面布置

1 大坝; 2—进水口; 3—一期加固工程; 4—二期加固工程; 5—厂房; 6—溢流坝; 7—导流明渠

泄量3800 m³/s, 固定式卷扬机操作。在水库发生诱发地震后, 为确保大坝安全, 又在左岸增建1条直径为10 m, 长778 m的泄洪洞, 最大泄量为1700 m³/s。4台机组最大引用流量490 m³/s。

水库诱发地震 水库于1959年10月20日开始蓄水, 同年11月记录到地震活动。1960年5月当水位蓄至81 m时, 发生了3~4次地震活动, 震级 $M_s=3.1$ 。同年7月18日水位达到90 m时, 记录到 $M_s=4.3$ 的地震活动, 震中烈度(Mercalli Scale)估计为5度。1962年3月19日水库水位110.5 m时发生了震级为 $M_s=6.1$ 的强震, 震中在坝下游1.1 km处, 震源深度约为5 km, 震中烈度约为8度。这次地震, 在13~18号坝段高程108 m附近产生了长达82 m的上下游贯穿性裂缝。2, 5, 10号坝段, 在同一高程附近也出现了不连续的水平裂缝。由于新丰江水库诱发地震的发生, 中国对诱发地震开展了综合性的科学研究, 包括1961~1973年3次大坝原型震动试验, 以及1981年对新丰江大坝头部抗震稳定问题的模型试验和非线性计算分析。从1961年3月起至1967年止, 对新丰江大坝做了两期工程加固, 对支墩间空腔部分填实, 并在坝趾加浇钹台, 最后达到设计烈度9.5度和百年一遇洪水位110 m相组合的标准。截至1964年底, 新丰江大坝附近记录了超过18万次微震。以后22年又增加了12万次, 其中大于2度的有1.3万次。地震活动于1962年3月19日达到 $M_s=6.1$ 的高峰后即逐年迅速减弱。

运行效益 水电站发电以来至1987年底, 累计发电238.698亿 kW·h, 承担广东电力系统的调峰、调频和事故备用任务。水库发挥了拦洪错峰作用, 提高了下游的防洪能力。例如1981年一次洪水, 新丰江水库拦蓄21.7亿 m³, 占洪水总量的80%, 使下游洪峰流量减少19.5%, 水位下降0.87~1.04 m。改善下游航道300 km, 通航流量由100 m³/s提高到250 m³/s, 通

航船舶由 20~60 t 提高到 200~500 t。农田排涝受益面积达 40~142 万亩。

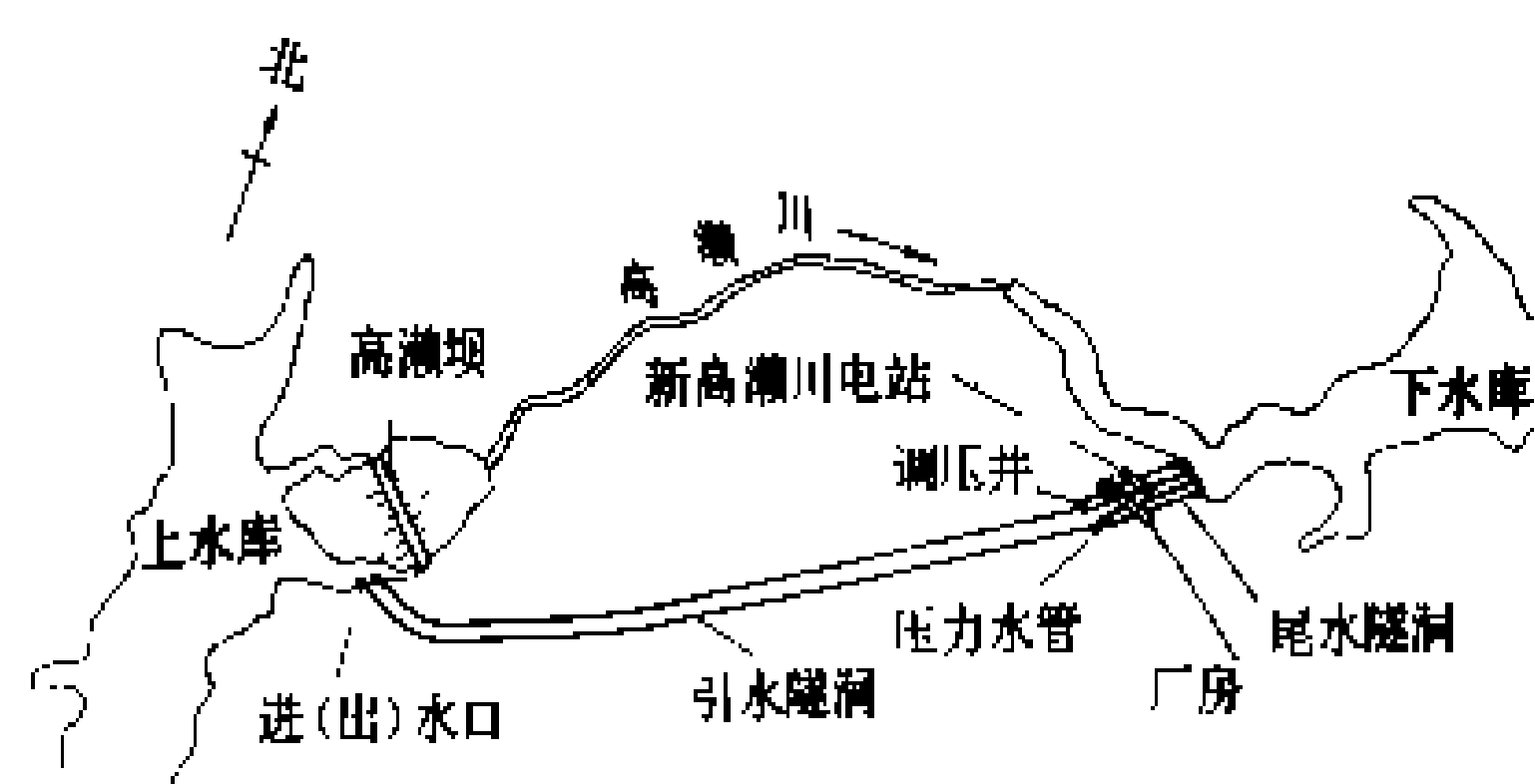
设计和施工单位 广东省水利电力勘测设计研究院设计, 新丰江水电工程局施工。

(李维藩)

Xin'gaolaichuan Choushui Xu'neng Dianzhan

新高瀨川抽水蓄能电站 (Shin Takasegawa Pumped Storage Power Station) 位于日本本州岛中部高瀨川上, 在东京以西 180 km 的岳山公园风景区内, 为混合式抽水蓄能电站, 装机容量 1280 MW。年发电量 11.99 亿 kW·h, 其中抽水蓄能发电 9.65 亿 kW·h, 天然来水发电 2.34 亿 kW·h。以 400 kV 超高压输电线路接入东京电力系统。工程于 1971 年 11 月开工, 1979 年 6 月第一台机组并网发电, 1981 年竣工。

上水库和下水库 在高瀨川上兴建心墙土石坝形成上下水库。上水库的高瀨坝最大坝高 176 m, 下水库的土仓坝最大坝高 125 m。上下水库之间距离约 3 km, 共有落差 230 m。电站布置见图。



新高瀨川抽水蓄能电站平面布置图

上水库坝址以上集水面积 131 km², 多年平均流量 13 m³/s。正常蓄水位 1278 m, 相应库容 7620 万 m³, 最低运行水位 1268 m, 调节库容 1620 万 m³。下水库坝址以上集水面积 150 km², 多年平均流量 14 m³/s。水库最高蓄水位 1049 m, 相应库容 3250 万 m³, 最低运行水位 1020 m, 调节库容 1620 万 m³。

上游引水系统 上水库右岸, 设 2 个高 9 m, 宽 9.5 m 的喇叭形进水口。进水口由滑动闸门控制, 前设拦污栅和固定型防涡流设施。2 条引水隧洞为圆形断面, 内径 8 m, 1 号洞长 2622 m, 2 号洞长 2741 m。2 条隧洞的中心距离为 40 m。引水隧洞末端各设 1 个阻抗式调压井, 高 98 m, 内径 15 m, 阻抗孔内径 4 m。2 条隧洞末端分别以“Y”形岔管引出 2 条压力钢管。压力钢管长 305~322 m, 剖面布置呈“Z”形, 在上下水库两侧为 2 个水平段, 中间为竖井段, 井深 230 m。钢管内径由 5.65 m 渐变至 3.4 m, 进入厂房。

地下厂房 主厂房长 163 m, 宽 27 m, 高 54.5 m, 内装 4 台可逆式混流机组。主变压器洞位于厂房下游侧 65 m 处, 长 108 m, 宽 20 m, 高 35.3 m, 安装有 4 台三相变压器。厂房下游 4 条尾水隧洞为圆形断面, 内径 6.4 m, 长 227~296 m。出水口为喇叭形, 共 2 孔, 高 8.5 m, 宽 10.6 m。

机组设备 4 台立轴单级可逆式混流机组, 额定容量 320 MW。水泵水轮机转轮直径 6.4 m。发电工况时, 最大和最小水头分别为 241 m 和 202 m, 相应发电流量分别为 155 m³/s 和 150 m³/s, 相应最大和最小出力分别为 336 MW 和 230 MW。抽水工况时, 最大和最小扬程分别为 264 m 和 230 m, 相应抽水流量分别为 100 m³/s 和 128 m³/s, 相应最大和最小输入功率分别为 297 MW 和 200 MW。发电电动机为立轴半伞式, 额定容量为 367 MV·A, 额定电压 18 kV, 频率 50 Hz, 转速 214.3 r/min。水泵起动方式: 2 号和 4 号机采用辅助电动机, 1 号和 3 号机采用“背靠背”方式。

(熊思政)

xinhao xitong

信号系统 (signalling system) 机电设备运行状态和事故或不正常运行工况的显示和报警装置。设备运行状态包括水轮发电机组的运行状态, 断路器等开关设备的跳、合闸, 闸门、阀门的开、闭, 自动装置投、切的运行状态等, 可用不同颜色的标牌显示, 但主要是用不同颜色的灯光显示。采用灯光显示时, 设备状态改变前、后的稳定状态用平光显示, 状态变化过程中有时用闪光显示。设备发生事故或不正常运行工况时的显示装置, 包括独立光字牌、边光显示器、坐标制光字信号装置、信息处理装置、机组事故和不正常运行工况指示灯、音响信号、事故时间显示等。发生事故或不正常运行工况时, 除显示灯光外, 还采用明显的文字标示事故或不正常运行工况性质, 同时发出音响提醒运行人员, 并靠事故时间显示记下事故发生时间。随着计算机监控系统和各类信息处理装置在水电站的应用, 进而采用屏幕显示器(CRT)显示各种设备状态和状态变换情况, 用事件顺序记录装置自动记录事故发生顺序, 并用打印机打印制表记录各类事故或不正常运行工况性质。

设备状态显示 设备状态显示包括如下内容。

(1) 水轮发电机组运行状态有开机准备、发电运行、调相运行三种, 一般分别用白色、红色、蓝色信号灯显示。

(2) 断路器的跳、合闸状态分别用绿色、红色信号灯显示。在断路器现地操动机构柜中一般装有绿色和红色标牌显示跳、合闸状态。断路器采用弱电选控时,



在选中被控对象后,由选择对象元件使对象灯闪光,以核对选线是否正确。执行控制指令后,在选择对象元件未复归前,对象灯以新的位置状态发出闪光,以核对执行指令正确与否。待选择对象元件复归后,对象灯发出平光,以显示运行状态。

(3)隔离开关跳、合闸状态显示信号以往只用于改变电气设备运行工况的隔离开关,一般有三种显示方式:①利用灯泡燃亮和熄灭来表示隔离开关合上还是切开。②利用灯光点亮纵向或横向亮带来表示合上还是切开。③利用非发光型指示器的可转动的标线位置来表示,标线与主接线的模拟线一致表示隔离开关合上,标线与模拟线相交成 90° 则表示隔离开关切开。采用屏幕显示后,有关检修用的隔离开关、接地隔离开关的状态也均可在屏幕显示器(CRT)上显示。

(4)闸门、阀门及自动装置的工作状态通常采用红灯表示设备或装置的开启或投入,绿灯表示设备或装置的关闭或切除。

事故和不正常运行工况显示 为了使运行人员迅速而又一目了然觉察到发生事故或不正常运行工况的性质,设置了灯光示字信号、音响信号,有的还自动打印制表。

(1)光字牌。过去由于光字牌尺寸大,在屏台上很难布置过多光字牌,只好将信号适当归并,例如通常设备的电气事故和机械事故仅分别设一个总信号,给运行带来一定的不便。为了解决布置上的困难,研制了弱电小型光字牌、组合式光字牌。

(2)边光显示器。该显示器的灯泡装在示字牌的两边,并有多层光字显示,当点亮其中一层的灯泡时,即显示该层的示字信号。当在一个显示器内同时点亮两层以上灯泡时,将看不清示字牌上的文字,故需另设选层器件,遇到两层以上灯泡同时点亮时,利用选层器件依次逐层选出所显示的信号。

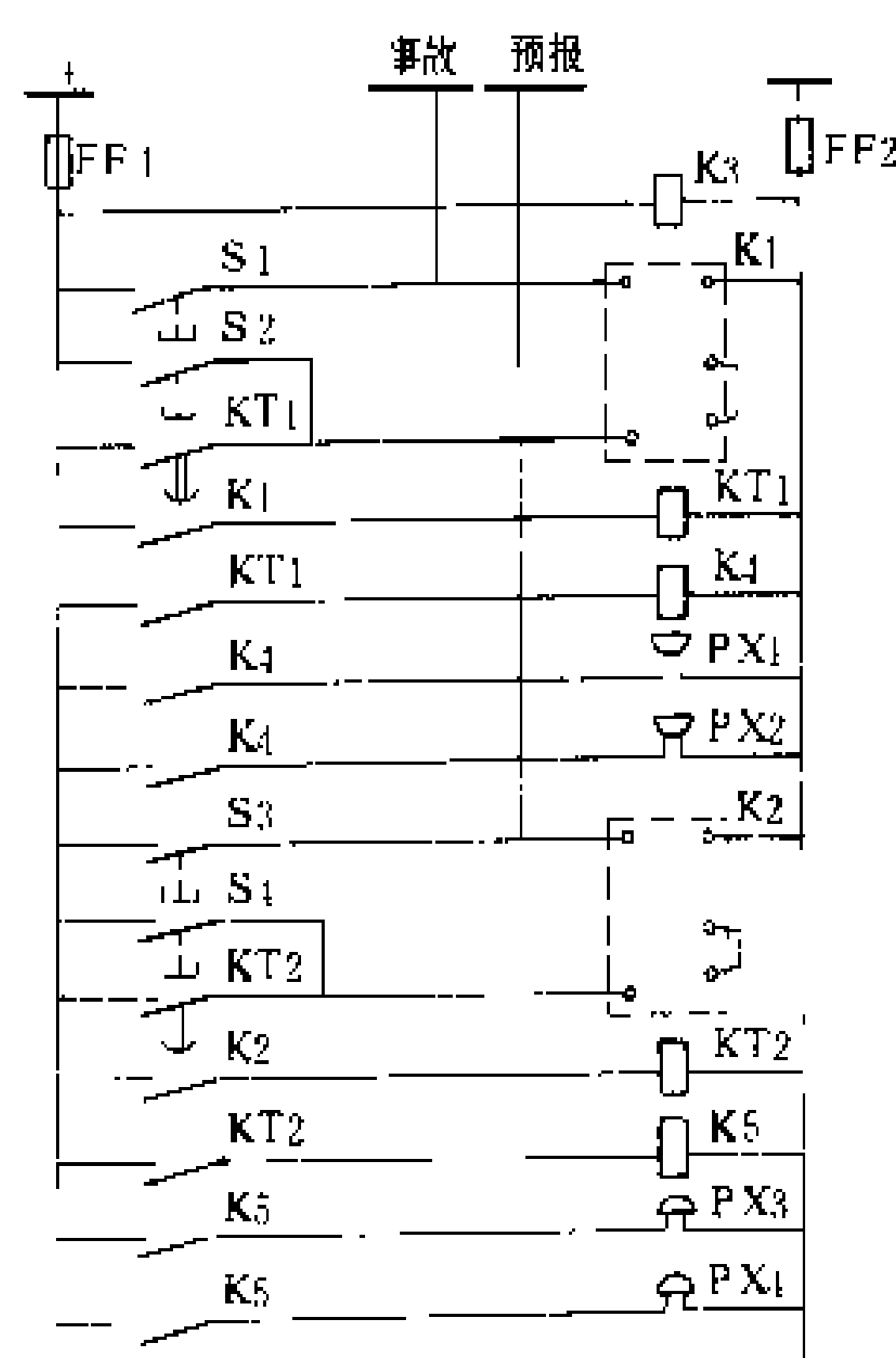
(3)坐标制光字信号装置。为了减少光字牌数量而又不归并信号,将相同性质的设备或线路(如几台机组、几台主变压器和几条线路),分别合用一组显示事故和不正常运行工况的性质的公用光字牌,而用对象指示灯显示发生事故或不正常运行工况的对象。两者同时显示,就可判明哪一个设备发生了什么性质的事故或不正常运行工况,故称之为坐标制光字信号装置。显然,当两个或多个机电设备同时出现两个以上事故或不正常运行工况时,就分不清哪个设备发生什么性质的事故或不正常运行工况,故需另设选信器件,靠它依次选出哪一设备发生了什么性质的事故或不正常运行工况。

(4)信息处理装置。随着电站的机组台数、出线回路数及其他机电设备的增多,设备容量的加大,事故和

不正常运行工况的种类和数量也大大加多,边光显示器、坐标制光字信号装置仍难以满足需要。因此只能将事故和不正常运行工况的最主要的信号用光字牌显示,其余信号则通过巡回检测装置或计算机监控系统等信息处理装置所属的屏幕显示器(CRT)加以显示,并用打字机打印出事故、不正常运行工况性质,供运行人员监视和查阅。为了便于分析事故或不正常运行工况的先后顺序,近年来在水电站中还装设了事件顺序记录装置,将发生的事件按顺序自动记录下来。

(5)机组事故和不正常运行工况大灯。对于机组台数较多的水电站,为了使运行人员及时判别发生事故或不正常运行工况的机组,在主机室设置对应于机组顺序号的事故和不正常运行工况指示大灯。

(6)音响信号。为了使运行人员及时觉察到设备发生事故或不正常运行工况,除光字显示外,尚需及时发出音响信号。事故和不正常运行工况要设置不同的音响以示区别。通常事故音响信号为蜂鸣器发出的音响;不正常运行工况音响信号为电铃发出的音响。音响发出后,一般经过几秒钟就能自动解除。如果接着又发生其他事故或不正常运行工况,可以再次重复发出音响。中央音响信号接线图见图示。



中央音响接线图

图中 K1、K2 为冲击继电器, PX1、PX2 为设在两个不同地点的蜂鸣器以反映事故音响, PX3、PX4 为设在两个不同地点的电铃以反映不正常运行工况音响。

(7)事故时间显示。发生事故时,要将中控室内一个交流电钟的电源切断,使电钟停转以显示发生事故的时间。装有计算机监控系统等信息处理装置时,可由这些装置自动打印出事故发生的时间。

(8)对于无人值班的水电站,当机电设备发生事故

或不正常运行工况时应将必需的信号送往上级调度所和在家值班的人员。

(张德平)

xuanshi shuilun fadianji

悬式水轮发电机 (suspended type hydro-generator) 见立式水轮发电机。

xuanyizhi nisha

悬移质泥沙 (suspended load) 在水流中悬浮运动的泥沙。悬移质多为细沙和粘土颗粒,是河流输沙量的主要部分,它常给水利水电工程带来一系列问题,如水库淤积、河道演变、引水渠首及渠系的淤积等。研究悬移质沿垂线分布问题目前有两种理论,即扩散理论与重力理论。按照泥沙相对粗细及来源不同悬移质又分为床沙质与冲泻质。

扩散理论与重力理论 扩散理论认为,泥沙能被悬浮并远距离输送主要受水流的紊动扩散作用。由床面的剪切作用产生的紊动漩涡在向主流区上升时,能将含沙量较高的下层水流输送到含沙量较低的上层水流中。同时,泥沙由于重力作用而下沉,在两者共同作用下,泥沙以一定的分布形式在水流中悬浮,并能远距离输送。重力理论的主要概念是为使悬移质泥沙在水流中不下沉,水流要付出一部分能量以保持泥沙悬浮,即水流要付出悬浮功。根据能量平衡原理,推导出悬沙沿水深分布规律。

悬移质含沙量的垂线分布 悬移质沿垂线分布是不均匀的,通常接近床面处的含沙量最大,水面附近含沙量最小,其分布可用扩散理论导出的下列方程表示

$$\frac{S_y}{S_a} = \left(\frac{h-y}{y} \times \frac{a}{h-a} \right)^2$$

式中 h 为水深; S_y, S_a 分别为距床面距离为 y 和 a 处的含沙量; $Z = \frac{\omega}{ku_*}$; ω 为泥沙沉速; k 为卡门常数; u_* 为剪力流速。在通常流速条件下,细颗粒泥沙 Z 值小,下层水流的含沙量远大于上层水流。

床沙质与冲泻质 悬移质粒径是不均匀的,其中较粗的部分在床沙组成中大量存在,称为床沙质,较细

的部分是床沙中少见的,称为冲泻质(或分别称作造床质与非造床质)。两者间既相区别又相联系,其界限与水流强度有关。划分床沙质与冲泻质在建立悬移质挟沙能力公式方面有重要意义。因水流中的冲泻质含量决定于河流上游的补给条件,和水流条件无密切关系。水流中的床沙质含量则和水流条件床沙组成存在较好的力学关系。目前常采用的划分床沙质与冲泻质的方法是取床沙级配曲线上相应于 5%~10% 的粒径,作为界限粒径。

参考书目

钱宁,万兆惠.泥沙运动力学.北京:科学出版社,1983

(姜乃森)

xunqi xianzhi shuiwei

汛期限制水位 (restricted water level in flood period) 汛期为上、下游防洪及水库安全预留调洪库容而设置的水库正常运行允许的最高蓄水位。又称防洪限制水位。有时为了减少库区泥沙淤积,也设汛期限制水位。

汛期限制水位一般低于正常蓄水位。汛期,在正常运行时,库水位不得超过汛期限制水位。仅当入库洪水超过设计标准时,才允许超过汛期限制水位,而按洪水调度规则调度。

水库汛期限制水位,在汛期各时段(月或旬)可以是不同的。当大洪水时,需留较大的防洪库容,汛期限制水位较低,当入库洪水逐渐减小,汛期限制水位可相应提高,汛期过后可提高到正常蓄水位。

从汛期限制水位至防洪最高水位之间的库容为防洪库容。汛期限制水位至正常蓄水位之间的库容为水资源利用和调洪共用的库容。共用库容的设置,可以降低防洪最高水位,相应降低坝高,减少建设费用,但也相应增加了汛后蓄不到正常蓄水位从而减少发电和综合利用效益的风险。因此,共用库容,要根据河流洪水特性,经过分期洪水分析计算和调洪计算,进行技术经济比较确定。

(伍宏中)

Y

yali guandao

压力管道（penstock）从水库（压力前池或调压室）向水轮机引水的有压管道，又称高压管道。其特点是坡度陡，直接承受水击作用，内水压力大。压力管道的路线选择应尽量短，以节省投资，减少水头损失及水击压力，改善机组运行条件。

按布置方式分有露天式、坝式和地下式三种。

（1）露天式。布置在地面，多用于从调压室或压力前池向地面厂房水轮机引水。它多沿垂直等高线的山坡布置，避免布置在地表水集中的谷地。其布置要求同引水明管。

（2）坝式。有坝内管，坝后背管，坝前管（见引水系统）等类型，多用于混凝土坝坝后式、溢流式及坝内式厂房。

（3）地下式。布置在山体中，多用于从水库或调压室向地下厂房或地面厂房的水轮机引水。它一般在隧洞中安装钢管，并在管外回填混凝土，进行回填灌浆和

固结灌浆。山体雄厚，岩质坚硬、完整的地段可不衬钢管，只在靠近厂房的水平段设钢板衬砌。由于内水压力可由钢管和周围的岩体共同承担，钢管可以较薄，如其承担外水压力能力不够时，需在钢管外壁设加劲环或加锚钩与外层混凝土联在一起，以增加钢管抗外压稳定的能力。地下式压力管道应尽量布在坚固、完整、地下水位较低的岩体中，其布置型式有竖井和斜井两种。斜井的坡度决定于开挖方法：从开挖的上部出碴，坡度需较缓，一般不陡于 35°；向下溜碴运出时，坡度要大于 45°，现代施工多采用后者。相邻管道和管道上岩石应有足够的厚度，以保持覆盖岩层的稳定。管线尽量与岩层断裂的走向保持较大的交角。

按供水方式分有单独供水、分组供水和联合供水三种（见图）。

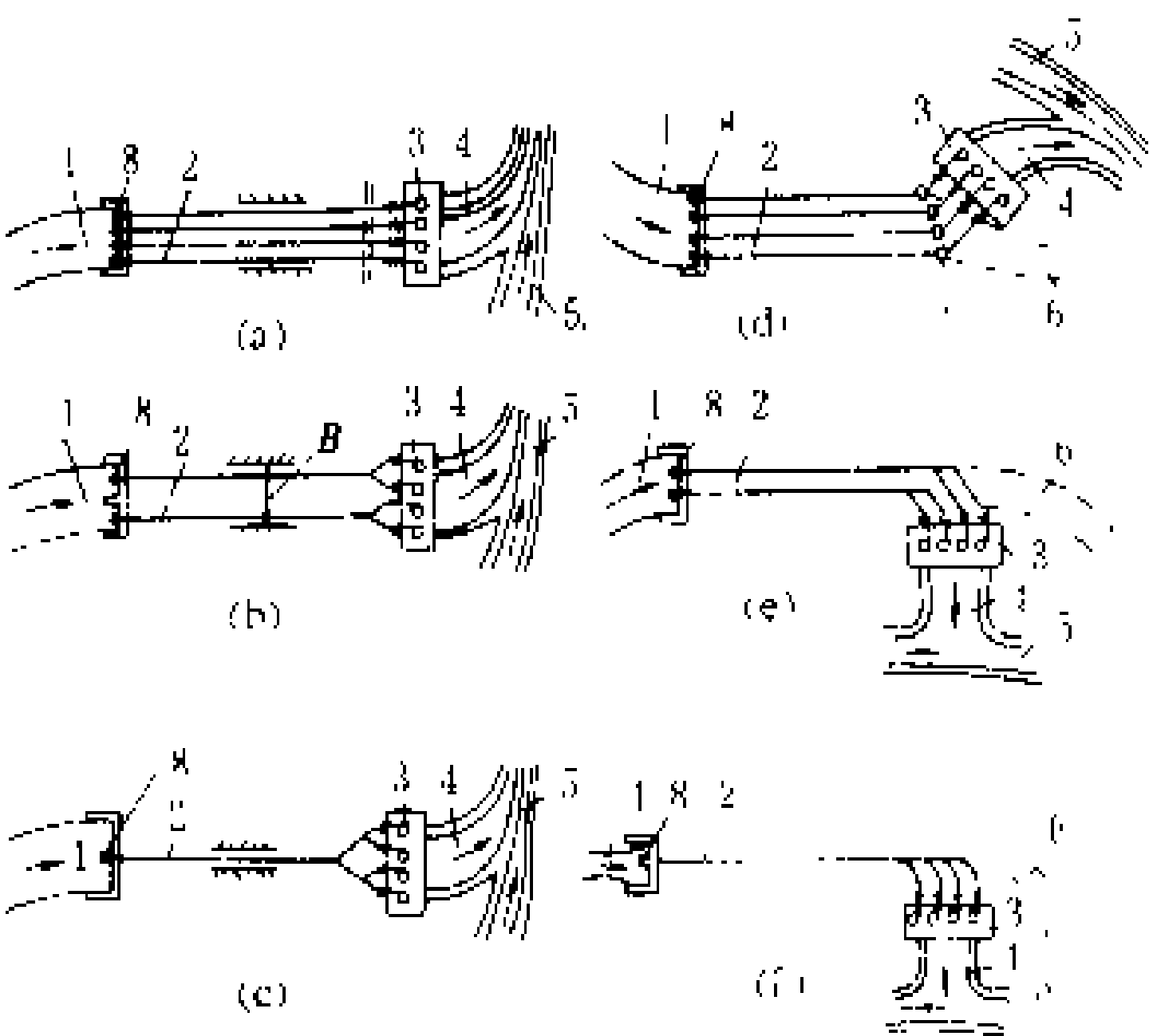
管道进厂方向对厂房纵轴而言有正向、斜向、纵向三种（见图）。正向布置，如管道破裂，对厂房威胁较大。斜向和纵向布置可减轻水管破裂时对厂房的威胁。由于优质钢材和先进焊接技术的采用，压力管道破坏的几率极小，管道方向对厂房安全已不起决定作用，而主要取决于地形、地质和各建筑物相对位置布置上的要求。

（刘维德 王树人）

yali qianchi

压力前池（fore bay）连接无压引水道与压力管道，为水轮机调节水量和水位、平稳水流的水池。它设于水电站无压引水道与压力管道联接处。并设有排除杂物、泄放弃水等设施。它由池身、压力墙、压力管道进水口、泄水道、排污、排砂、排冰道等组成。各建筑物视需要而设置，某些建筑物可结合使用，如排污、排冰及排沙道可共用一个陡槽。压力前池的布置见图。压力前池的池身要能容纳一定的水体积，多利用有利地形，扩宽、加深形成。池身与引水道间设渐变段。压力墙由混凝土及钢筋混凝土做成，承受水压力较大。压力前池位置的选择应特别注意地基稳定和渗漏条件。

压力前池的功能有 5 项。①调节水量。无压引水道水流经过压力前池平稳地分配到各压力管道。当机组出力增加时，从前池补充水量。当出力减小时，前池可容纳多余的水量。它一般具有日调节功能。②平稳水流。当水电站减负荷时，流入压力管道的流量将发生急剧减少，利用压力前池的容积和设有的溢流设施，能迅速消灭涌浪，平稳水流，故它又称平水池，参见图（a）、（b）。③设置闸门保证事故关闭和检修。在压力墙内设压力管道进水口，进水口设事故闸门、检修闸门、通气孔和启门设备。在事故情况下，事故闸门

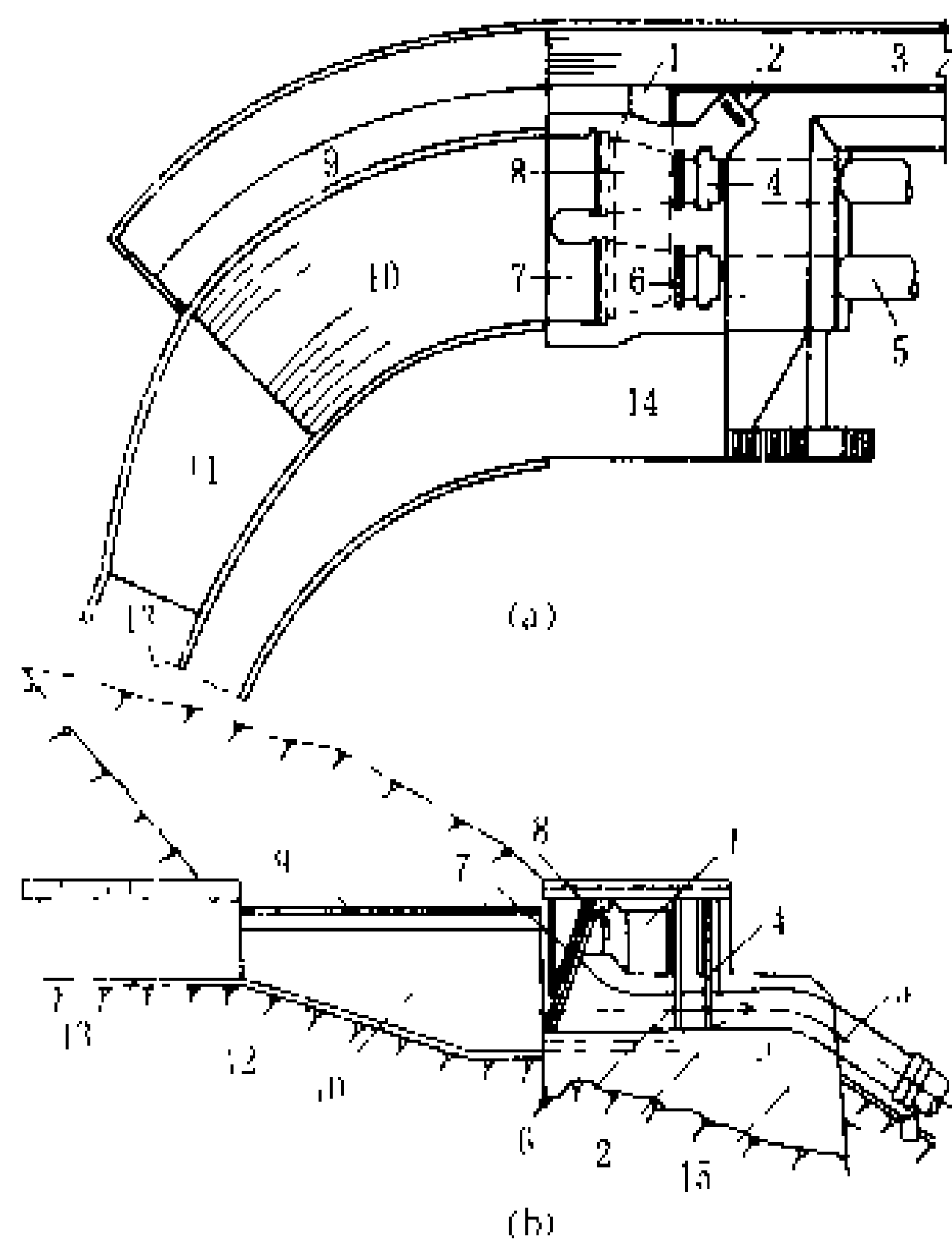


水管的根数和向机组的供水方式

（a）单独供水（正向布置）；（b）分组供水（正向布置）；（c）联合供水（正向布置）；（d）单独供水（斜向布置）；（e）分组供水（纵向布置）；（f）联合供水（纵向布置）
1—压力前池；2—压力水管；3—厂房；4—尾水渠；5—河流；6—排水渠；7—坝墩；8—闸门（闸门）；B—管沟开挖宽度



可紧急关闭。通气孔向压力管道中补气,避免管道内形成真空。④排除污物、冰凌和泥沙。压力管道进水口设拦污栅及清污设备,以清除从渠道流来的漂浮物。并可在压力管道进水口附近设排污道。排污道可用叠梁控制,以调整排污水位;在寒冷地区,排冰、排污道可结合使用。由于压力前池中流速低,具有一定的沉沙作用,沉沙可用排沙廊道排出。排沙廊道宜设置在压力管道进水口下面,以利水流推动泥沙进入廊道。⑤保证电站下游用水。在电站停止运行时,为保证电站下游用水,需设置泄水道,如图示旁侧溢流堰,在堰后设置泄水陡槽。



压力前池布置图

(a) 平面图; (b) 剖面图

- 1—排冰排污道;2—排沙道;3 陡槽;4 工作门槽;5 压力管道;6 检修门;7 拦污栅;8—排冰道叠梁槽;9—溢流堰;10—压力前池;11 扩散段;12 池底;13 引水明渠;14—检修平台;15—镇墩

(刘维德 王树人)

yali shang sheng lü

压力上升率 (pressure rise ratio) 水轮机压力引水管内水流被导水叶或针阀快速截断时所产生的水压升高值(水锤值)与当时静水头之比的百分值,以 ξ 表示。压力上升率是水轮机调节保证计算的重要内容,是引水管、水轮机和水工建筑物的重要设计依据之一,导水叶或针阀的关闭时间愈长压力上升率愈小。机组甩负荷导水叶关闭时在导水叶前端将产生水锤,水锤有直接水锤和间接水锤两种。

直接水锤 导水叶关闭时,当水锤波沿引水管上行至上游水面再反射至导水叶的反射时间 t_r ($t_r =$

$2L/a$) 大于等于导水叶的关闭时间 t_s 时产生,其值为

$$\Delta H = \pm \frac{a \Delta v}{g}$$

压力上升率则为

$$\xi = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100\%$$

式中 a 为水锤波传播速度, m/s; Δv 为引水管中流速变化差值 $=v_0-v_m$, m/s; v_0 、 v_m 为导水叶关闭前和关闭后引水管中的平均流速, m/s。

间接水锤 当水锤波反射时间 t_r 小于导水叶的关闭时间 t_s ,导水叶前端出现间接水锤。导水叶为直线关闭规律时,第一相水锤压力上升率为

$$\xi_1 = \frac{2\sigma}{1+\rho\tau_0\mp\sigma} \times 100\%$$

末相水锤压力上升率为

$$\xi_m = \frac{2\sigma}{2\mp\sigma} \times 100\%$$

式中 σ 为管道特性系数甲, $\sigma = \Sigma Lv/gH_0\tau_0$; ρ 为管道特性系数乙, $\rho = a\Delta v/2gH_0$; τ_0 为导水叶起始开度,%; ΣLv 为引水管、蜗壳及尾水管内的流速与其长度乘积的总值, m^2/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; H_0 为电站计算工况的静水头。

压力上升率限值 它是一个技术经济指标,早期允许幅值较低,随着技术的发展有所提高,中国允许的压力上升率幅值见表。

压力上升率允许幅值

电站计算工况的静水头 $H_0(m)$	<40	40~100	>100	冲击式水轮机设置空放阀
压力上升率允许幅值 $\xi(\%)$	50~65	50~30	<30	≤ 15

(青长庚)

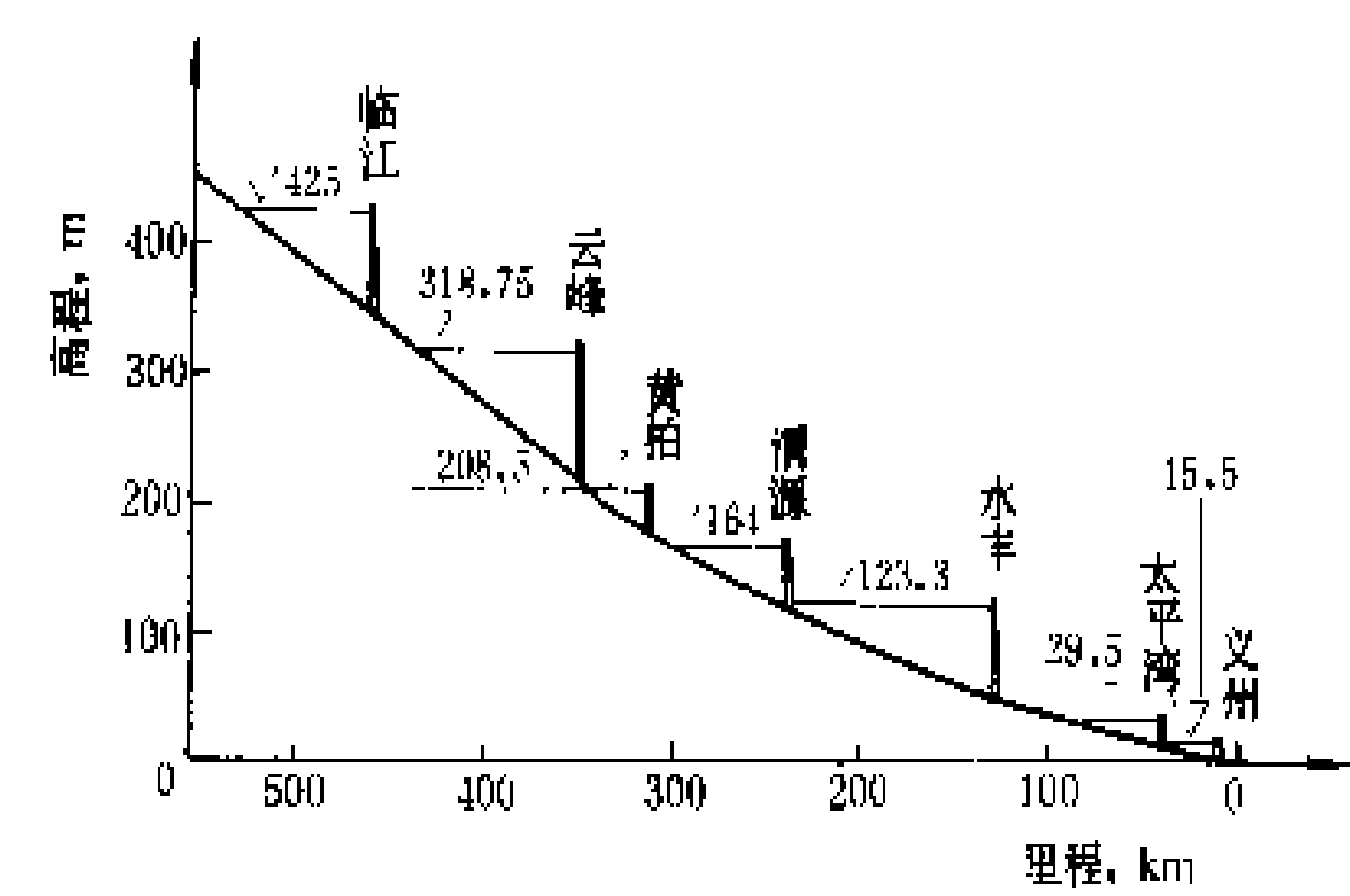
Yalu Jiang shuidian guihua

鸭绿江水电规划 (hydropower development planning of Yalu river) 据1989年水利水电规划设计总院编制的《十二大水电基地》,鸭绿江干流上规划布置有临江、云峰、黄柏、渭源、水丰、太平湾、义州共7级水电站。梯级共利用水头366 m,总库容215.8亿 m^3 ,其中调节库容115亿 m^3 ,共装机2340 MW,平均年发电量合计为93.4亿 $kW \cdot h$ 。梯级水电站布置见图。

鸭绿江流域跨中国和朝鲜两国。鸭绿江干流是两国的界河,发源于长白山南麓,从东北流向西南,注入黄海。本流域天然流域面积为64471 km^2 ,朝鲜在其国内从本流域跨流域引水到其他流域,引水口所控制的

Ya 鸭

流域面积为 5326 km², 本流域剩有 59145 km²。扣除跨流域引走的水量后, 鸭绿江河口处的多年平均流量为 830 m³/s。



鸭绿江干流梯级水电站布置图

开发任务是以发电为主, 兼顾防洪、供水、流筏、航运等。鸭绿江梯级规划工作由中国、朝鲜两国政府共同组建的中朝鸭绿江干流规划工作小组 (20 世纪 80 年代改为中朝鸭绿江、图门江干流规划小组) 进行。经长期研究协商后已经确定八道沟以下河段的梯级组成 (见图)。其中水丰水电站于 1937 年开始建设, 1943 年建成, 后因战争部分破坏, 1955 年完成改建, 装机 630 MW。80 年代又进行扩建, 现装机 900 MW。云峰水电站于 1959 年开始建设, 1965 年开始发电, 装机 400

MW。太平湾水电站始建于 1982 年, 1985 年开始发电。渭源水电站即将建成。临江和义州两座水电站的设计工作正在进行。已建的 4 座水电站是中国、朝鲜两国地区电网的主要电源, 为地区国民经济发展起了重要作用。水丰和云峰水电站的水库库容较大, 可进行多年调节, 是梯级的骨干工程。临江水电站具有不完全年调节水库, 而渭源和太平湾水电站的水库只进行日调节。

水丰、云峰、渭源水电站的技术经济指标见水丰水电站、云峰水电站和渭源水电站。

(曹学敏)

Yalu Jiang shuixi Zhongguo bufen shuine ng ziyuan
鸭绿江水系中国部分水能资源 [hydropower resources of Yalujiang river system (within China)]

鸭绿江干流及其中国侧支流天然条件下蕴有的能量 (理论蕴藏量), 其中部分经过开发可以利用 (可能开发资源)。据 1980 年《中华人民共和国水力资源普查成果》统计, 鸭绿江水系中国境内部分理论蕴藏量为 156.4 亿 kW·h/a, 其中可能开发资源量为 73.66 亿 kW·h/a。鸭绿江干流为中国和朝鲜的国界河流, 其能量按中国和朝鲜各半统计。水系中国部分水能资源分布见表。

鸭绿江水系中国部分水能资源分布表

河 流 名 称	流域面积 (km ²)	多年平均 流量 (m ³ /s)	河道长度 (km)	水面落差 (m)	利用水头 (m)	理论蕴藏量 (亿 kW·h/a)	可能开发资源	
							装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kW·h)
水系合计						156.4	2027.8	73.66
其中:								
干流: 鸭绿江	64471	960	800	2440	497.6	93.1	1184.8	49.42
支流: 浑江干支流	14776	227	445	744	246.1	49.3	726.5	19.95
蒲石河	1206	26.7	122	585	192	3.1	18.7	0.73
暖河干支流	5902	111.5	197	494	90.4	10.9	64.3	2.38
其他支流							33.5	1.18

水系概况 全水系流域面积 64471 km², 其中在中国境内的有 32000 km², 位于吉林和辽宁两省。鸭绿江干流发源于长白山天池, 自东北流向西南。干流西侧为中国, 东侧为朝鲜。西侧主要支流有浑江、蒲石河和暖河。浑江发源于长白山系的老岭, 自北向南流。其流域面积为 1.4776 万 km²。鸭绿江干流及浑江是本水系中水能资源最丰富的河流。

水能资源 鸭绿江水系雨量充沛, 平均降水量 870 mm, 自上游向下游递增。干流河长 800 km, 大部河道流经山区, 河谷宽一般为 500~2000 m, 河口多年

平均流量 960 m³/s, 水能资源开发条件好, 是本水系中可能开发资源最多的河流, 可能开发 14 座水电站。按中国、朝鲜两国各半统计, 中国拥有理论蕴藏量 93.1 亿 kW·h/a, 可能开发水电站装机 1184.8 MW, 年发电量 49.42 亿 kW·h。其中已开发 940 MW, 年发电量 39.55 亿 kW·h。

浑江河长 445 km, 水面落差 744 m, 流域面积 1.4776 万 km², 河口多年平均流量 227 m³/s。浑江河道多蛇曲, 河谷多处狭窄, 水能资源开发条件也较好, 干支流可能开发 30 座水电站。浑江干流拥有理论蕴藏

量 38.1 亿 kW·h/a, 可能开发水电站装机容量 640 MW, 年发电量为 17.2 亿 kW·h。其中已开发装机 490 MW, 年发电量 12.6 亿 kW·h。

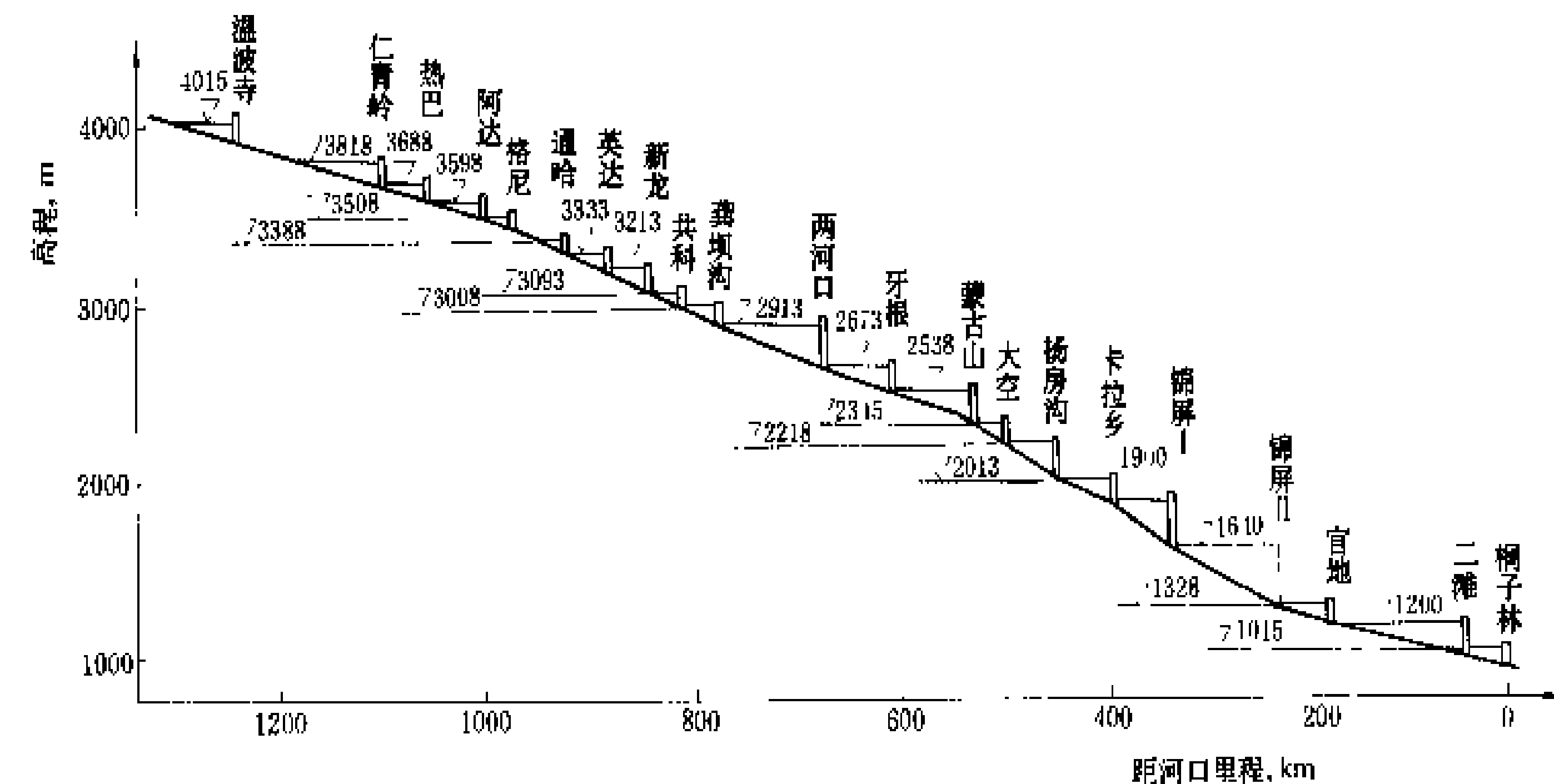
鸭绿江水系的其他一些支流(中国侧)上还可开发一些中小型水电站。

(曹学敏)

Yalong Jiang shuidian guhua

雅砻江水电规划 (hydropower development planning of Yalong river)

根据 1980 年《中华人民共和国水力资源普查成果》和成都勘测设计院于 1979 年提出的《雅砻江锦屏大河湾梯级开发研究报告》,雅砻江梯级水电站由温坡寺、仁青岭、热巴、阿达、格尼、通哈、英达、新龙、共科、龚坝沟、两河口、牙根、蒙古山、大空、杨房沟、卡拉乡、锦屏一级、锦屏二级、官地、二滩、桐子林共 21 级水电站组成(见图)。21 级水



雅砻江梯级水电站布置图

电站共利用水头 2834 m, 总库容 355 亿 m³, 其中调节库容 223 亿 m³, 可装机 2285 万 kW, 多年平均年发电量有 1462 亿 kW·h。

雅砻江发源于青海省巴颜喀拉山南麓, 由北向南纵贯四川省甘孜藏族自治州和凉山彝族自治州, 于攀枝花市汇入金沙江。干流河长 1528 km, 河水面自海拔 5400 m 下降到 980 m, 天然落差 4420 m, 流域面积 13 万 km², 河口处多年平均流量 1770 m³/s。干流水能理论蕴藏量(见水能资源)为 1927 亿 kW·h/a。

雅砻江水资源开发利用以发电为主, 其可能开发装机容量占四川省资源量的 25%, 而电量占 28%。四川省水能资源丰富, 煤炭资源缺乏, 雅砻江梯级水电站将在四川省电力系统中占有主导骨干地位。四川省其他水电站丰、枯水期供电很不均衡, 而雅砻江梯级中有两河口、锦屏一级和二滩 3 座调节性能好的水库可以

提高系统水电站群整体的供电质量。雅砻江两河口以下河段具有地形地质条件良好、河水含沙量小、水库淹没少、技术经济指标较优等优点, 所以两河口以下的河段是重点开发对象, 利用水头 1900 多 m, 总库容 285.3 亿 m³, 其中调节库容 169.5 亿 m³, 总装机容量和年发电量占全梯级的 86%~88%。两河口、锦屏一级和二滩水电站是径流调节的骨干工程。二滩水电站已经开工建设, 锦屏一级和锦屏二级水电站正进行可行性研究阶段设计工作。

(陈励元)

Yaluzangbu Jiang shuixi shuineeng ziyuan

雅鲁藏布江水系水能资源 (hydropower resources of Yarlungzangbo river system)

据 1980 年《中华人民共和国水力资源普查成果》统计, 雅鲁藏布江水系中国境内部分的水能资源理论蕴藏量

为 9940.61 亿 kW·h/a, 占中国的 16.8%, 仅次于长江水系而居中国第二位; 其中可能开发资源 2815.28 亿 kW·h/a, 占中国的 14.6%, 也居第二位。

雅鲁藏布江发源于中国西藏自治区西南部喜马拉雅山北麓的杰马央宗冰川,

河源称杰马央宗曲, 里考以下称雅鲁藏布江。江水自西向东流经日喀则、泽当等地, 在米林县下游河道形成一大河弯后折向南流, 经巴昔卡后进入印度, 称布拉马普特拉河, 于孟加拉国与恒河相汇合后流入印度洋。

雅鲁藏布江水系中国境内流域面积 24.05 万 km², 干流长 2057 km, 落差 5435 m, 平均年径流量 1394 亿 m³。

雅鲁藏布江是世界上海拔最高的一条大河, 河源海拔 5590 m, 中上游河段海拔 3000 m 以上, 下游河道急剧下切, 出中国境处海拔 155 m, 落差巨大, 水能资源十分丰富。干流的理论蕴藏量达 6931 亿 kW·h/a, 占全水系的 69.7%, 而且集中于林芝县以下河段, 形成可能开发巨型水电站的特殊条件。支流蕴有的水能资源比重较小, 其中较丰富的支流有拉萨河、尼洋曲、帕隆藏布、易贡藏布和锡约尔河, 其理论蕴藏量在 150

Ya 雅

亿~768 亿 kW·h/a 之间。

由于对雅鲁藏布江干支流的开发研究仅限于拉萨河、年楚河、沃卡河等,对于流的研究尚处于初步设想阶段,所以可能开发资源统计数据是初步的。全水系可能开发水电站的装机容量 4738 万 kW,其中干流的为 4638 万 kW。干流可能开发水电站的年发电量 2765 亿 kW·h, 占全水系的 98%。

干流从林芝县到墨脱县为一大河弯,河道长 213 km,落差达 2190 m,而河弯两端间的直线距离仅 39 km。利用该河弯可建一座引水式水电站,装机容量 3800 万 kW,平均年发电量 2285 亿 kW·h(80 年代规划为装机容量 4380 万 kW,年发电量 2630 亿 kW·h)。

(赵毓崑)

Yaxileita Shuidianzhan

雅西雷塔水电站 (Yacyreta Hydropower Station)

位于南美洲巴拉那河阿根廷与巴拉圭两国边界河段上,在伊泰普水电站下游 470 km。初期装机容量 2760 MW,年发电量 203 亿 kW·h。留有扩建位置,以后可扩建至 4140 MW。阿根廷侧用 3 回 500 kV 超高压输电线路、巴拉圭侧用 2 回 220 kV 高压输电线路分别送电。电站除发电外,其水库可淹没阿比佩(Apipe)急滩,并建船闸,有利航运。还可引水灌溉巴拉圭侧 8.1 万 ha 和阿根廷侧 0.6 万 ha 耕地。主坝为心墙土坝,最大坝高 42 m。工程于 1983 年 12 月开工,预计 1993 年开始发电,1996 年竣工。由阿根廷和巴拉圭组成的雅西雷塔两国委员会建设和管理。建设期投资全部由阿根廷筹措。建成投产后,巴拉圭把应分得的大部分电量交阿根廷使用,以偿还应分担的一半投资的本息,还清后各按 50% 分电分利。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 97 万 km²,多年平均流量 11900 m³/s,年径流量 3750 亿 m³。水库正常蓄水位 82 m,相应库容 210 亿 m³,调节库容 19 亿 m³,仅能作周、日调节。正常尾水位 61.4m。最大水头 24.1 m,设计水头 21.3 m,最小水头 19.2 m。设计洪水采用可能最大洪水,洪峰流量 95000 m³/s,最高拦洪水位 84.5 m。

枢纽布置 坝址位于巴拉那河的雅西雷塔河心岛处,跨越主河槽和安娜夸副河槽。坝顶总长 69600 m,为当前世界最长的坝。主河槽内,自右向左依次为:河床式厂房(长 808 m)、主溢洪道宽 343.5 m、主坝(心墙土坝,长 1900 m,最大坝高 42 m)、单线船闸、左侧心墙土坝(长 1800 m)、左岸土堤(长 15000 m)。自发电厂向右为:雅西雷塔河心岛上长 18400 m 的副坝、跨越副河槽宽 307 m 的安娜夸副溢洪道、长 30700 m 的右岸土堤,见图 1 和图 2。

主溢洪道设 18 个溢洪孔,每孔净宽 15 m,高 19.5 m,副溢洪道设 16 个溢洪孔,每孔净宽 15 m,高 15.5 m。闸墩厚均为 4 m。孔口用弧形闸门控制,采用消力池消能。在最高拦洪水位时,两座溢洪道的泄洪量分别为 55000 m³/s 和 40000 m³/s。

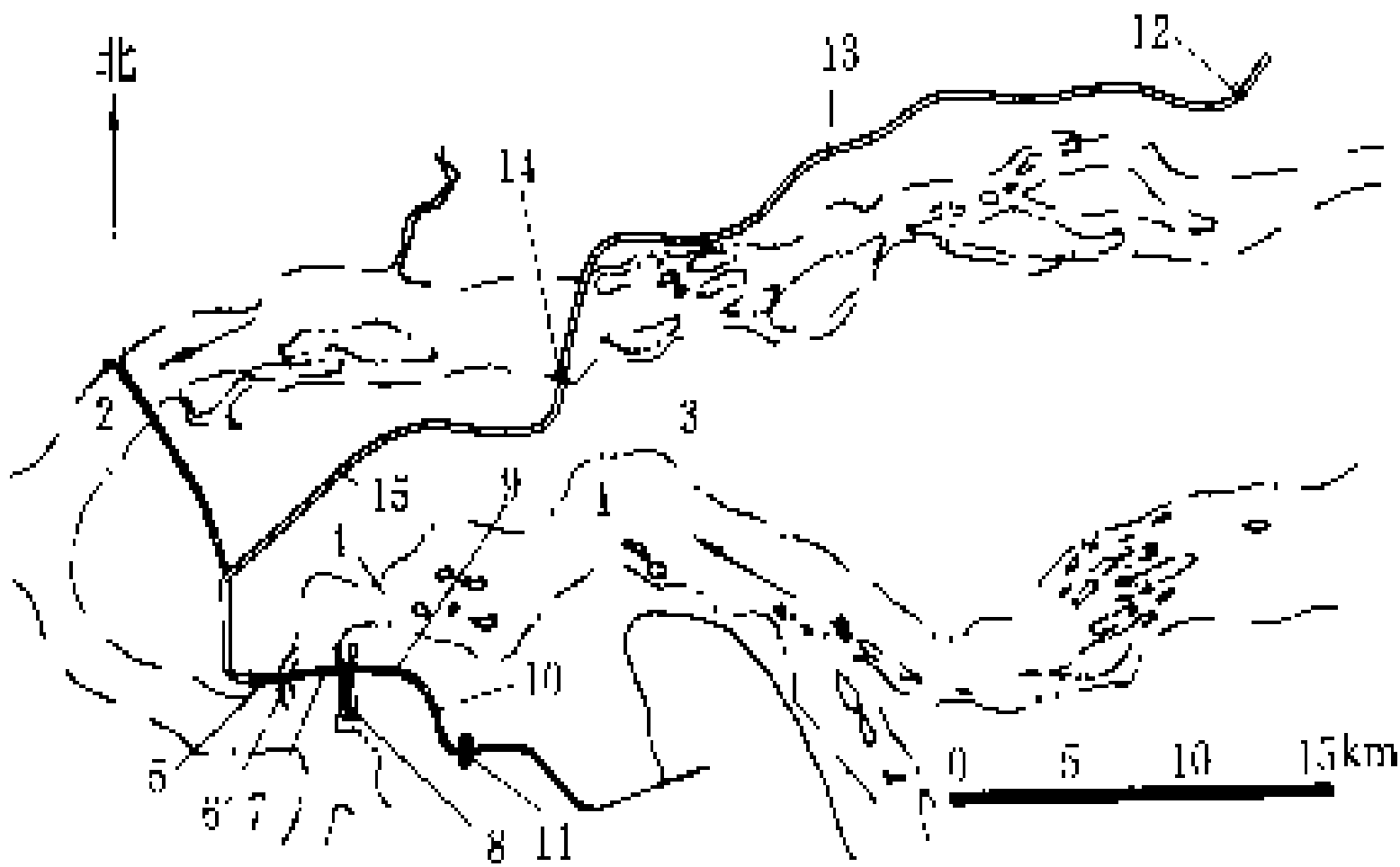


图 1 雅西雷塔水电站总体布置图

- 1 巴拉那河主河槽; 2—安娜夸副河槽; 3—雅西雷塔河心岛; 4 阿比佩急滩; 5 发电厂房; 6 主溢洪道; 7 主坝(心墙土坝); 8 船闸; 9—左侧心墙土坝; 10 左岸土堤; 11—阿根廷侧灌溉进水口; 12 巴拉圭侧灌溉进水口; 13—右岸土堤; 14—安娜夸副溢洪道; 15 雅西雷塔河心岛副坝

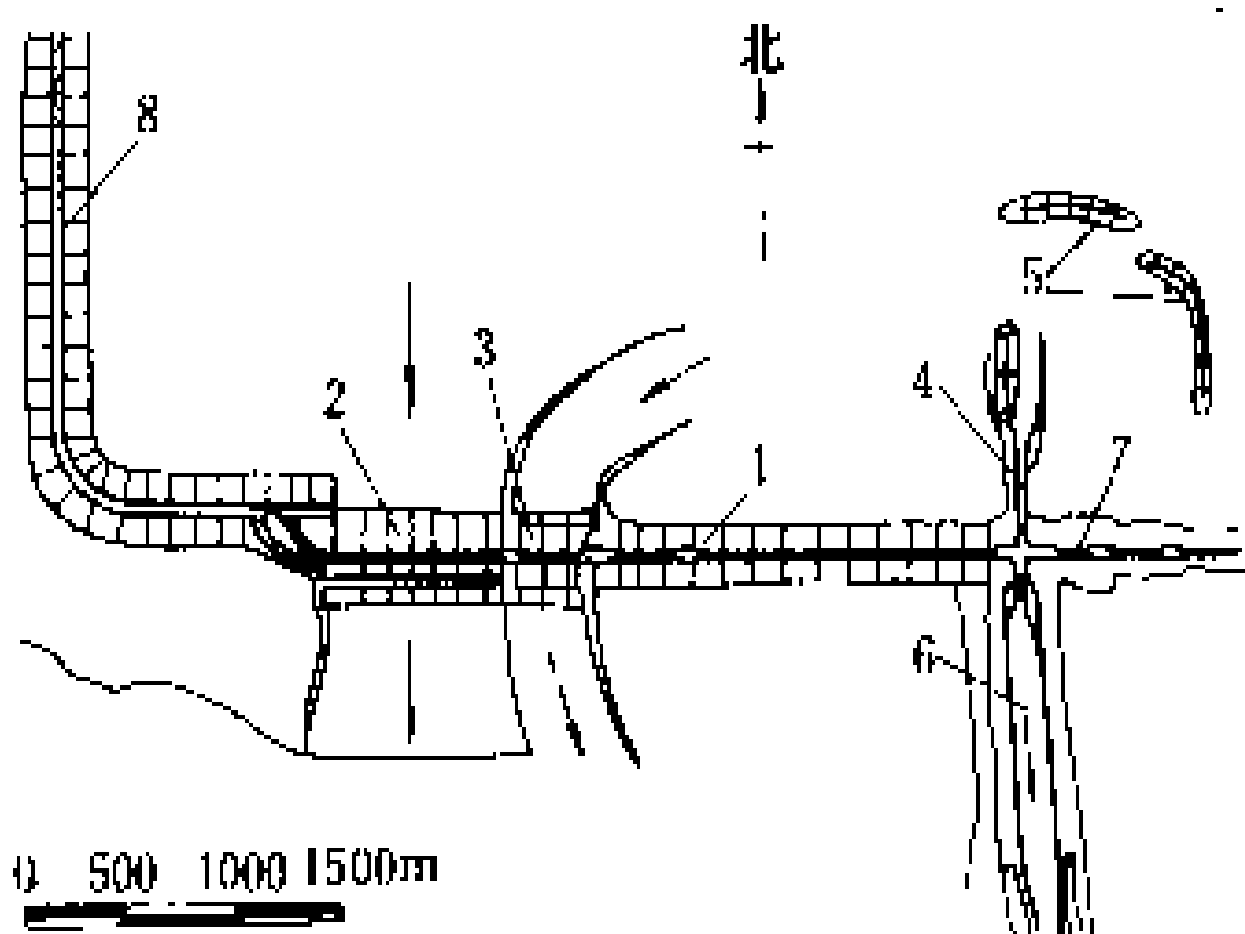


图 2 雅西雷塔水电站主要工程平面型

- 1 主坝; 2 发电厂房; 3—主溢洪道; 4—船闸闸室; 5 防浪堤; 6 引航道; 7 左侧心墙土坝; 8 雅西雷塔河心岛副坝

发电厂房内初期安装 20 台转桨式水轮发电机组,单机容量 138 MW,机组间距 36 m。预留扩建 10 台机组的地位。水轮机额定水头 21.3 m,转轮直径 9.45 m,转速 71.4 r/min。发电机额定容量 172.5 MV·A,功率因数 0.9,电压 13.2 kV,频率 50 Hz。每台发电机连接 1 台三相变压器,升压至 500 kV。电站设 2 台 500 kV/220 kV 自耦变压器。

船闸闸室净宽 27 m,长 236 m,可通过吃水深 3.66 m 的船只,上游设有防浪堤。船闸的上闸首闸门采用高 9 m 的轮式门。下闸首闸门采用 30.3 m 高的人字门。阿根廷侧和巴拉圭侧的灌溉进水口,分别建在左岸土堤和右岸土堤上。

工程量和投资 上石方开挖 2180 万 m³，土石方填筑 6440 万 m³，混凝土浇筑 330 万 m³。1987 年 5 月估计投资 24.7 亿美元，施工期和还本期利息 41.2 亿美元，共计 65.9 亿美元，单位投资 2440 美元/kW。

(陆钦侃)

yazhou shuinneng ziyuan

亚洲水能资源 (hydropower resources of Asia)

据英国《国际水力发电和坝工建设》1993 年手册统计，除苏联外亚洲具有水能理论蕴藏量 123000 亿 kW·h/a，技术可开发资源 48600 亿 kW·h/a，经济可开发资源 26500 亿 kW·h/a。加上苏联亚洲部分后分别为 155500 亿、68400 亿、36700 亿 kW·h/a，居各大洲的首位。

亚洲陆地总面积约为 4457 万 km²，共有 37 个国家。亚洲气候跨寒、温、热 3 带。东亚的东南部、东南亚和南亚是湿润区，北亚的大部为半湿润、半干旱区，中亚、西亚及东亚内陆为干旱区。干旱区占全洲面积的 1/3。亚洲地形起伏大，中部有世界最高的高原和山脉，山地、高原和丘陵占全洲面积的 3/4。全洲平均海拔 950 m，是世界上除南极洲外最高的洲，因此许多河流的落差大。

基于上述地形和降水条件，亚洲境内水能资源丰富的河流有长江、叶尼塞河、勒拿河、布拉马普特拉河、印度河、湄公河、黑龙江、黄河、珠江、阿姆河等近 20 条河流。其中许多河流根据防洪、发电、灌溉、供水、航运等综合利用要求拟定有开发规划，并在实施中。中国水能资源情况见水能资源。苏联亚洲部分水能资源情况见苏联水能资源。

湄公河发源于中国，在中国境内称澜沧江，流经缅甸、老挝、泰国、柬埔寨和越南，注入南海，全长 4500 km。其流域面积 79.5 万 km²，平均年径流量 4750 亿 m³。湄公河上游中国境内的水能资源见澜沧江水系水能资源，自缅甸老挝边界的昌盛以下称下湄公河，长 2350 km，编有综合利用规划，干支流规划有 10 座大水电站，共可装机 27460 MW，年发电量 1409 亿 kW·h。

印度河发源于中国，流经印度和巴基斯坦，全长

2900 km，流域面积 116.55 万 km²，平均年径流量 2096 亿 m³。印度、巴基斯坦境内干支流规划有 17 座水电站，装机容量共 14500 MW，已建成 9 座共 10300 MW。

幼发拉底河上游在土耳其，流经叙利亚和伊拉克，与底格里斯河汇合后称阿拉伯河，流入波斯湾。土耳其境内已建 3 座水电站，共装机 5440 MW。

亚洲若干国家水能资源及 1991 年已开发利用程度见表。

亚洲若干国家水能资源及 1991 年利用程度

国 家	理论蕴藏量 (亿 kW·h/a)	技术可开发 资 源 (亿 kW·h/a)	经济可开发 资 源 (亿 kW·h/a)	1991 年已建 常 规 水 电 (亿 kW·h/a)	利用 程 度 (%)
中 国	59222	19233	12600	1248	6.5
印 度	26378	6000	4500	717	12.0
印度尼西亚	7090	4016	1500	57	1.4
尼 泊 尔	7295		1440	7	
土 耳 其	4330	2160	1266	227	10.5
日 本	7176	1347	1143	892	66.2
緬 甸	3660	1600		11	0.7
巴 基 斯 坦	1500		1050	183	
马 来 西 亚	2179	1087		58	5.3
朝 鲜			800	291	
老 挝	1502		760	7	
柬 埔 寨			650	0.3	
伊 朗			560	75	
泰 国			500	50	
越 南			250	54	
菲 律 宾		492	200	61	12.4

注：资料来源：英国 International Water Power & Dam Construction 1993 年手册及各国资料。

(高又生)

yan bao

岩爆 (rock burst) 地下工程开挖过程中出现的围岩自行破坏，并喷射出来的现象。是围岩各种失稳现象中较强烈的一种。它具有突发性，在地下工程中对施工人员和设备威胁较为严重。

产生岩爆的条件是：①围岩应力集中形成的局部高应力状态；②围岩完整、性脆，容易发生断裂及脆性破坏；③能量足够，即岩石破坏释放的应变能除了供破坏消耗之外，还有足够的剩余能量转化为动能，造成岩石喷射。

埋深较大以及处在高地应力地区是发生岩爆的重要条件。地形和地质构造使天然岩体中局部应力集中的地区，开挖隧洞后也具有产生岩爆的条件。

岩爆多在开挖面附近发生,往往伴有破裂声,甚至爆炸声,在开挖初期活跃,持续一段时间后趋于平静。岩爆造成的围岩破坏,有的呈劈裂状,有的是剪切破坏状。轻微的岩爆仅将破坏后呈片状的岩石弹射脱离岩体,严重的岩爆可将破坏成大块体的岩石强烈地喷射到远处。

防治岩爆最根本的办法是根据地质、地形和地应力状态选好洞线位置及断面形状。岩爆往往在开挖后瞬间发生,用工程措施对它进行防治比较困难。在围岩上钻孔可以释放部分应变能并改善围岩应力状态。在开挖面打超前钻孔,效果更好。往钻孔中注水可以改变岩石弹性性质,钻孔附近微裂隙的发生,使岩体中储存的应变能下降,使发生岩爆的机会减少或者使岩爆减弱。对于随时间持续发生岩爆的部位,用喷混凝土或锚杆加固岩体的办法可以收到良好效果,在开挖后愈早进行愈好。

为保障施工人员和设备的安全,可以根据脆性岩石破坏过程中出现微破裂时伴发脉冲波的现象,采用微震仪或声发射仪监测;或者根据岩石破裂过程中的扩容现象,用变形仪或收敛计监测围岩变形,作出安全预报。

(陆家佑)

yanji chuli

岩基处理 (treatment of rock foundation)

通过人工方法提高水工建筑物的岩石地基的强度和抗渗性能的措施。采用这些措施,使岩基变形、承载能力和渗流量满足设计要求,以保证建筑物的正常运行。成岩过程中由于各种地质作用,岩基中形成层面、片理、节理裂隙、风化壳、断层破碎带、软弱岩(夹)层、河床深槽和喀斯特等地质构造,在不同程度上破坏了岩体的完整性,削弱了其力学强度。为使较差的岩基适应坝工建设的需要,必须进行妥善的处理。按目的和要求,岩基处理可分为提高岩基强度和完整性的加固处理、防止岩基渗流和降低渗透压力(扬压力)的防渗处理以及喀斯特处理3个方面。

岩基加固处理 根据基坑范围内岩基节理裂隙发育程度,断层破碎带、软弱岩(夹)层和河床深槽等的分布状况、产状、规模及其对岩基和大坝的影响程度,对岩基进行3方面处理,即:①断层破碎带、软弱岩(夹)层和河床深槽处理;②防止岩基不均匀沉降处理;③防止滑动处理。

断层破碎带、软弱岩(夹)层和河床深槽处理 常用混凝土置换法处理。对宽度小、陡倾角的断层破碎带或软弱岩(夹)层,当其对岩基的强度和压缩变形影响不大时,可将其挖除到一定深度并清除两侧破碎岩石,

然后用混凝土填塞。宽度较大而陡倾角的断层破碎带或软弱岩(夹)层,将引起坝体和岩基中应力分布恶化。可将其挖到一定深度并清除两侧破碎岩石,然后浇筑混凝土梁。处理深度可按简支梁或固端梁,以梁的挠度或梁底混凝土抗拉强度作为控制标准,用弹性力学或材料力学方法计算确定。对走向平行于河谷、直立或陡倾角、宽度较大的断层破碎带或深槽,其两侧为完整坚硬岩石时,为减少基坑开挖量,可在其上建混凝土拱,将坝体载荷传到两侧岩基,同时在拱下做好防渗处理。

防止岩基不均匀沉降处理 有以下几方面措施。

(1) 挖除。对基坑范围(包括两岸坝头部位)内的风化破碎岩石,可将其挖除,达到新鲜完整岩石或符合设计要求时为止。

(2) 固结灌浆。当因开挖工程量或施工条件限制,基坑范围内的破碎岩石不能彻底挖除时,可进行固结灌浆,使其强度和变形性质满足设计要求。

(3) 坝体结构措施。为防止岩基不均匀沉降对坝体的影响,可采用的结构措施有:扩大基础面积,限制坝底压应力不大于岩基的允许压应力;根据岩基不同变形性质,对坝体作合理分缝,以适应岩基不均匀沉降。

(4) 施工措施。根据各部位岩基变形性质不同,采用合理的坝体分块浇筑程序,达到调整岩基中的应力状态和不均匀沉降的目的。

防止岩基滑动处理 有以下几方面措施。

(1) 选择合理的基坑开挖深度和断面形式。当岩基中缓倾角的断层破碎带、软弱岩(夹)层埋藏较浅时,可适当加大基坑开挖深度,将其全部(或部分)挖除,把坝体建在完整岩基上。将基坑断面形式开挖成倾向上游,可提高坝底与岩基接触面的抗滑能力。

(2) 设置抗滑齿墙。当岩基中缓倾角的断层破碎带、软弱岩(夹)层埋藏较深,不能将其彻底挖除时,可根据设计要求,在基坑范围内沿坝轴线方向开挖一齿槽将其切断,然后回填混凝土或钢筋混凝土,形成与坝体相结合的抗滑齿墙。齿墙设置的部位和尺寸,根据结构布置和抗滑要求确定。通常,抗滑齿墙与灌浆帷幕(见帷幕灌浆)相结合,同时起到岩基防渗作用。

(3) 设置抗剪键。在岩基中缓倾角软弱岩(夹)层埋藏较深,而在其上下侧均为坚硬岩石,软弱岩(夹)层的存在影响岩基抗滑稳定时,可在软弱岩(夹)层中进行洞挖,将其挖除后回填混凝土或钢筋混凝土,形成抗剪键,提高岩基抗滑能力。20世纪80年代巴西和巴拉圭合建的伊泰普水电站,采用这种方法对岩基中平缓的角砾岩夹泥层进行了处理。抗剪键的布置和尺寸,根据设计要求确定。当岩基中存在多层缓倾角软弱岩(夹)层时,可采用在大口径钻孔或竖井中浇筑钢筋混凝土抗滑桩处理。

(4) 锚固。当岩基中存在多层缓倾角裂隙或软弱岩(夹)层时,可采用锚杆、钢索或预应力钢索锚固,以增加作用在软弱面上的法向应力,提高其抗滑能力。20世纪60年代,中国梅山水库首次采用预应力钢索锚固连拱坝右坝头岩基取得成功。

(5) 浇筑重力墩。对于拱坝,当两岸坝座部位岩石破碎无法利用,而将其挖除后高程又不够时,可浇筑混凝土重力墩,以满足坝肩稳定要求。

岩基防渗处理 河段上修建拦河闸坝后,形成上下游水位差,在岩基中引起渗流。由渗透水在岩基中形成的渗透压力和作用在建筑物底面上的扬压力及其对岩基的损害,直接影响岩基和闸坝的稳定。此时可采用混凝土截水墙、灌浆帷幕、防渗铺盖及排水孔等措施进行处理。

混凝土截水墙 有时与抗滑齿墙处理方法相结合,在坝踵部位沿坝轴线方向,开槽挖除破碎岩石至完整岩石(或相对不透水岩层),然后用混凝土填塞,形成截水墙。有时为满足防渗要求,在截水墙以下再设灌浆帷幕。对基坑范围内的顺河直立断层破碎带,可在坝踵部位,通过大口径钻孔或竖井,挖除其中充填物和破碎岩石,然后回填混凝土形成截水墙。

灌浆帷幕 根据岩基的水文地质和工程地质条件,确定帷幕布置及其向两岸延伸长度。帷幕下端一般应深入不透水(或满足防渗要求的相对不透水)岩层。当透水岩层很深时,形成悬挂式帷幕,其深度一般为 $(0.5\sim 1)H$ (H 为坝高)。灌浆帷幕的排数、灌浆孔间距、灌浆程序、灌浆压力、灌浆材料的选择及其配比,根据设计或通过现场试验确定。(见帷幕灌浆)

防渗铺盖 在坝前填筑粘土(或混凝土)层,或借库水中大量泥沙颗粒在坝前淤积,形成防渗铺盖,达到延长岩基中渗径和减少渗流量的目的。

排水孔 当岩基中渗流水难以完全堵截时,为消除或减轻渗透压力(扬压力)和渗流水对岩基的影响,通常在岩基中开挖隧洞(或在坝体底部设廊道)并钻孔,形成排水系统。排水系统布置,根据设计确定。

混凝土坝岩基主要处理措施见图。

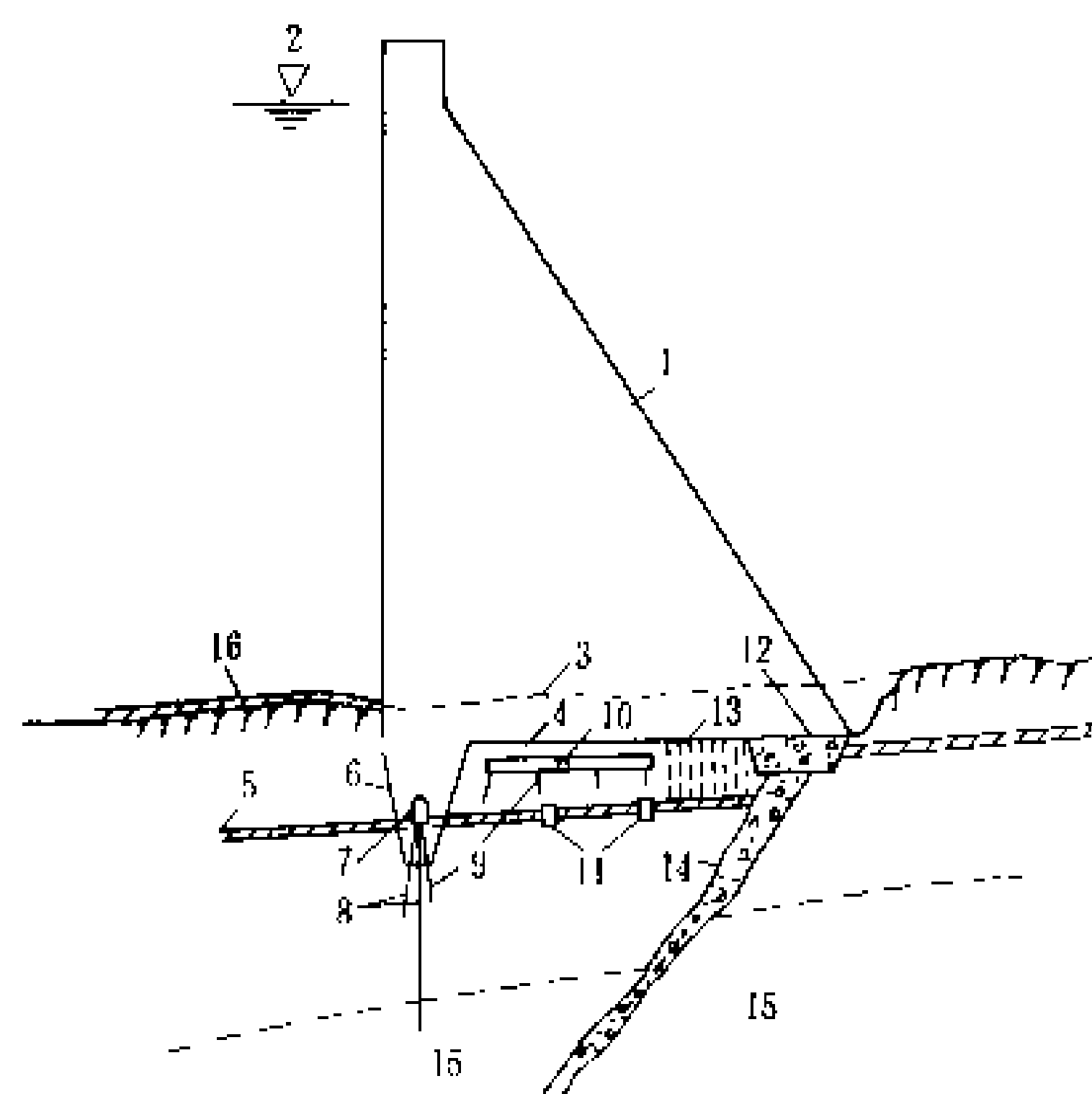
喀斯特处理 在石灰岩类岩石地区,由于地表水、地下水或两者结合的长期溶滤作用,岩层中形成各种喀斯特(岩溶)现象,如溶槽、漏斗井、溶洞和地下河等,成为地下水流的通道。对此如忽视或处理不当,坝建成后,水库可能蓄不起水。因此,查明喀斯特分布状况及其发育规律并进行正确处理非常重要。处理方法主要有明挖或洞挖后回填混凝土、灌浆,还有铺盖、隔离等方法。

明挖回填混凝土 对基坑范围内处于地表或埋藏较浅的溶槽、溶洞等,可采用明挖方法,挖除其中充填

物和周围破碎岩石,冲洗干净后用混凝土填塞,同时起到加固和防渗作用。

洞挖回填混凝土 对基坑范围内埋藏较深的溶槽、溶洞和地下河等,可采用洞挖方法,根据其分布状况,沿坝轴线方向,通过竖井或平洞达到岩溶所在部位,挖除其中充填物和周围破碎岩石,冲洗干净后用混凝土填塞并进行接触灌浆,形成地下截水墙。

灌浆 对处于岩基深部的溶槽、溶洞等,可通过钻孔,用高压循环水流(或水气混合流)冲洗其中充填物,而后灌浆填塞。也可用高压劈裂灌浆技术,固定溶洞内



混凝土坝岩基主要处理措施示意图

- 1 坝体; 2 上游库水位; 3 原地面; 4 基坑开挖线;
5 软弱岩(夹)层; 6 混凝土齿墙(或截水墙); 7—
灌浆廊道; 8 帷幕灌浆孔; 9—排水孔; 10—隧洞(供
排水和观测用); 11 混凝土抗剪键; 12—混凝土塞;
13 固结灌浆范围; 14 断层破碎带; 15 相对不透水
岩层; 16 坝前防渗铺盖

充填物,形成完整防渗帷幕。中国乌江渡水电站大坝修建在发育的石灰岩岩基上,采用高压水泥灌浆填塞岩基中充填泥沙的溶洞,收到很好的防渗效果。

(黄仁福)

yanrong

岩溶 (karst; solution cavern of rock)

见喀斯特。

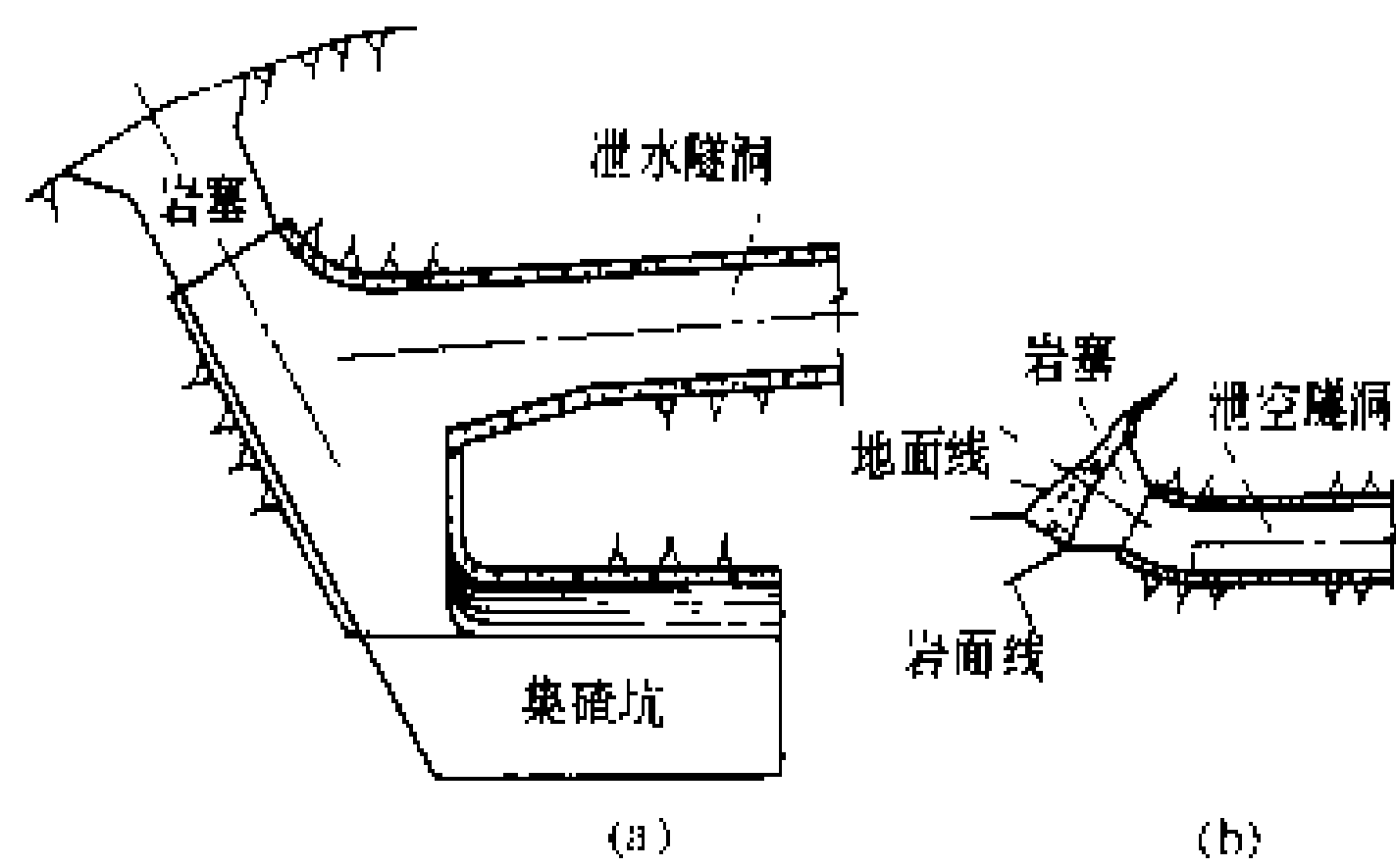
yansai baopo

岩塞爆破 (rock plug blasting) 在湖泊或水库的水下修建进水口,用爆破的方法将隧洞进口预留的岩石炸除的爆破技术。为开发利用天然湖泊进行发电、取水,或已建成的水库需要增建泄水或引水隧洞时,当受客观条件限制,不能大幅度降低水位,而修筑

围堰又十分困难或很不经济的情况下，可采用岩塞爆破的方法修建进水口。岩塞爆破之前，首先要从下游进行隧洞开挖和衬砌，做好闸门井以及闸门等控制工程。在进水口部位，需按要求预留一定厚度的岩石用以挡水，以便进行隧洞施工。等隧洞内各项工程全部完成，岩塞爆破的准备工作也都做好以后，将预留的岩石一次爆通，形成进水口。采用岩塞爆破的方法，不仅可省去围堰工程，还可不受水库水位和季节条件的限制，并且工程施工与水库的正常运行可互不干扰。

岩塞爆破设计 在岩塞爆破前，首先要做好设计，包括：①选定进水口的位置和形式。岩塞爆破形成的进水口，一般不再进行其他加固措施，因此在选择进水口的位置和形式时，既要注意地形、地质条件，保持岩塞体稳定并便于施工，又要考虑运行的要求，具有一定的过水断面和较好的水力条件。设计前须对进水口部位进行详细的地形地质勘测工作。②选定岩塞爆破方案，包括预留岩塞体的厚度、爆破方式、岩渣处理方式等。

岩塞爆破方案 ①爆破方式，常采用洞室爆破或排孔爆破两种。前者在预留的岩塞体内开挖洞室作为药室；后者则用钻机钻孔作为炮孔。为保证爆破后的进水口形状符合设计要求，常沿设计轮廓线布置较密的周边孔，结合进行预裂爆破或光面爆破。②岩渣处理方式，常采用集渣或泄渣两种。前者在岩塞的下部事先开挖集渣坑，爆破后大部分岩渣落在集渣坑内；后者则依靠水力将岩渣泄到隧洞下游。③当采用集渣方式时，又有敞开和堵塞两种方法。前者洞内闸门敞开，爆后通水流下泄；后者在隧洞内设临时堵塞段，爆破后再拆除，此法不常使用。



岩塞示意图

(a) 丰满水电站泄水隧洞进口；

(b) 密云水库泄空隧洞进口

中国丰满水电站于 20 世纪 70 年代在左岸增建一条泄水隧洞，进口岩塞爆破采用洞室爆破和集渣方式，见图 (a)。岩塞直径 11 m，岩塞体厚度 15 m，爆破药量 4.1 t，岩塞爆破方量约为 3800 m³。密云水库在潮河主坝右侧增建一条泄空隧洞，于 1980 年进行进口岩塞

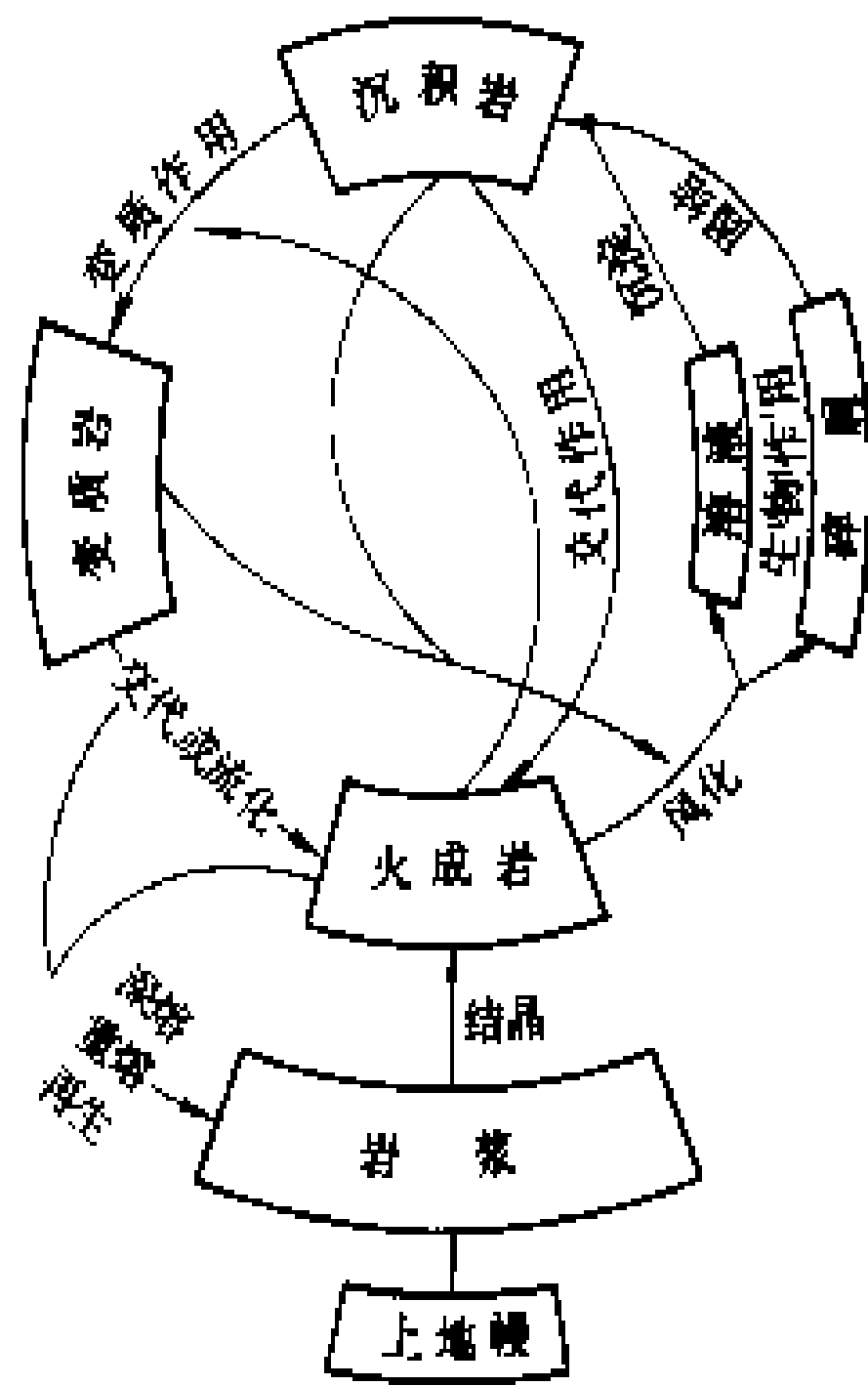
爆破，采用排孔爆破和泄渣方式，见图 (b)。岩塞底部直径 5.5 m，岩塞体厚度 5 m，爆破药量 738 kg，爆破方量 546 m³。

到 20 世纪 80 年代为止，世界上规模最大的岩塞爆破为加拿大休德巴斯 (Chute des Passes) 水电站的引水隧洞进口工程，岩塞直径约 18 m，岩塞体厚度 21 m，爆破药量 27.7 t，爆破方量 1 万余 m³。

(王庭济)

yanshi

岩石 (rock) 天然产生的具有一定结构、构造的矿物集合体。岩石是构成固体地壳的物质基础，也是构成建筑物地基和围岩的介质。岩石的强度取决于成因类型、矿物成分和结构构造。岩石学是研究岩石种类、性质、成分、形成过程以及演变历史的科学。岩石按其成因可分岩浆岩、沉积岩、变质岩，其相互关系和演变情况如图表示。



三大类岩石相互关系图

在地表以下 3 km 以内的称浅成岩，常为小岩体。侵入岩在地下深部相对密封条件下形成，冷却速度慢、压力高、挥发成分逸散慢，矿物结晶较粗，多呈显晶质结构，如花岗岩、正长岩、辉长岩等。②喷出岩。岩浆沿地壳薄弱带上升，由火山喷出地表成岩，亦称火山岩。一种是从火山溢流出的岩浆冷凝而成的岩石称熔岩，常呈岩流形式，如玄武岩；另一种是由火山喷发出来的各种碎屑物质从大气中降落下来堆积形成的岩石，粗颗粒的有火山碎屑岩，细颗粒的有凝灰岩等。由于岩浆在地表条件下冷却较快，喷出岩的结晶都比较细，多呈隐晶质结构、斑状结构或玻璃质结构，如流纹岩、安山岩、黑曜岩等。

侵入岩强度高、岩性均一，一般较完整，透水性小，常是较好的高坝坝基。喷出岩岩性较复杂，强度差别大，作为高坝地基需要进行较详细的勘察研究工作。侵入岩与围岩的接触带、蚀变带，喷出岩内的喷发间断面

常是强度较低的、影响岩体稳定的软弱带（面），往往是工程地质勘察的重点。

沉积岩 地球表面由风化作用、生物作用以及火山作用产生的物质经搬运、沉积和成岩作用形成的岩石。按其成分和搬运、沉积方式不同，还可分碎屑岩、化学岩和生物岩。

(1) 碎屑岩。已有岩石的风化碎屑，经机械方式搬运至异地沉积，压密固结、胶结成岩，占沉积岩的大部分。按碎屑物的粒径不同，有砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩等。碎屑岩的强度取决于成分和固结、胶结程度和胶结物的性质，如硅质、铁质、钙质胶结的岩石强度一般高或较高；泥质胶结的岩石强度就较低或低。砾岩、砂岩一般透水，可含水；粉砂岩、泥岩、页岩等一般不含水且隔水，可利用作为大坝的防渗依托；砂页（泥）岩互层时可出现承压含水层；泥页岩的顶部受层

间错动和地下水积聚影响往往形成软弱夹泥层。

(2) 化学岩。经化学作用溶解物质的溶液经搬运、富集后沉积形成，成岩作用以重结晶为主。按溶解物质的溶解度、浓度及温度、酸碱度的影响，化学沉积按氯化物→硅酸盐→碳酸盐→硫酸盐→卤化物次序沉积，占沉积岩的少部分，有石灰岩、石膏、岩盐等。化学岩具可溶性是其一大特点，石灰岩的喀斯特化会造成水库、坝基的大量渗漏；岩层中的石膏成分的溶滤可削弱地基强度直至破坏。

(3) 生物岩。生物作用形成或由生物残骸组成的岩石，在沉积岩中所占数量很少，有贝壳灰岩、生物灰岩、煤等。一般强度低。

总之沉积岩成分各异（见表1），物理力学性质相差悬殊，具有成层产出的特点，力学性质各向异性明显。工程地质勘察中需要根据情况仔细研究。

表 1 主要沉积岩分类表

岩类	结 构		主 要 矿 物 成 分	主 要 岩 石	
				松 散 的	胶 结 的
碎屑沉积岩	砾状结构 >2 mm		岩石碎屑式岩块	角砾、碎石、块石	角砾岩
				卵石、砾石	砾岩
	砂质结构 2~0.05 mm		石英、长石、云母、角闪石、辉石、磁铁矿等	砂、土	石英砂岩、长石砂岩
	粉质结构 0.05~0.005 mm		石英、长石、矿物、碳酸盐矿物	粉砂	粉砂岩
粘土岩	泥质结构 <0.005 mm		粘土矿物为主，含少量石英、云母等	粘土	泥岩、粘土岩、页岩
化学沉积岩及生物沉积岩	化学结构及生物结构	致密状、粒状、鲕状	方解石为主，白云石		泥灰岩、石灰岩
			白云石、方解石		白云质灰岩、白云岩
	结核状、鲕状、块状、纤维状、致密状		石英、蛋白石、硅胶	硅藻土	燧石岩、硅藻岩
			钾、钠、镁的硫酸岩及卤化物		石膏、岩盐、钾盐
			碳、碳氢化合物、有机质	泥炭	煤、油页岩

变质岩 原岩经变质作用后形成的，在矿物成分、结构构造上与原岩不同的岩石。地球上已形成的岩石（岩浆岩、沉积岩、变质岩）随地壳的演变，所处的地质环境不断地改变，为适应地质环境和物理-化学条件的变化，其矿物成分、结构、构造会发生一系列变化。这种由地球内力使岩石发生矿物成分、结构、构造变化的作用称为变质作用。不同类型的变质作用产生不同类型的变质岩。

由动力变质作用（又称碎裂变质作用或破裂变质

作用）形成的岩石称动力变质岩。岩石在构造运动产生的定向压力下发生变形和破碎或轻微重结晶，如构造角砾岩、碎裂岩、糜棱岩、千糜岩、假熔岩等。

接触变质作用和热液交代变质作用是在岩浆岩体边缘和围岩接触带上，在岩浆高温和流体影响下，使岩石变质或伴有交代作用。由热接触变质作用形成的岩石称热接触变质岩，有角岩、大理岩等；由接触交代作用形成的岩石称接触交代变质岩，常见有矽卡岩。这类变质岩分布局限、规模不大。

地壳活动带伴随强烈造山运动所产生的一种大面积的区域性的变质作用称区域变质作用（热动力变质），所形成的变质岩称区域变质岩，常伴有混合岩化作用，影响因素复杂，混合岩化后称混合岩。岩石被强烈变形和片理化，具明显的板状、千枚状、片状和片麻状构造。多分布于结晶基底和造山带中，中国华北地块和塔里木地块的区域变质岩构成中国大陆的古老核心。

原岩为火成岩的变质岩称正变质岩，原岩为沉积岩的称副变质岩。变质岩简易分类见表 2。

表 2 主要变质岩简易分类表

变质作用	主要分类		次要分类	
	依据	岩名	按主要矿物成分	按结晶程度
区域变质	板状构造	板岩		
	千枚状构造	千枚岩		
	片状构造	片岩	云母片岩、黑云母片麻岩、滑石片岩、角闪石片岩	片岩、结晶片岩
	片麻状构造	片麻岩	花岗片麻岩、黑云母片麻岩、斜长石片麻岩、角闪石片麻岩	
接触变质	变晶结构	石英为主	石英岩	
	块状结构	方解石为主	大理岩	
动力变质	碎裂结构、压碎结构、糜棱结构		碎裂岩、压碎岩、糜棱岩	

变质岩除少数如云母片岩、千枚岩等外一般强度较高，花岗片麻岩常是较好的地基岩石。在工程勘察中对变质岩需注意研究岩体的各向异性、风化带和软弱矿物富集带等，对论证坝基（肩）抗滑、防渗以及边坡、洞室围岩稳定问题十分重要。

（郝绮霞）

岩石坝基处理（treatment of rock dam foundation）见岩基处理。

岩石边坡（rock slope）地壳表部一切具有侧向临空面的岩地质体。岩石边坡有自然边坡和人工开挖边坡。在工程建设中，通常按岩性、岩体结构和变形形式等工程地质特征，对岩石边坡进行分类。岩石边坡失稳破坏的形式有：剥落、滑动、崩塌、倾倒和蠕动等。影响岩石边坡稳定的因素有内在和外在两个方

面。内在因素包括岩石的构成与特性、岩体结构特征、地应力状态、岩体中软弱面（带）的分布特征等，对边坡稳定起控制作用。外在因素包括风化作用、地表水和地下水活动、地震和人为作用等，与内在因素结合促使边坡变形的发生和发展。水电工程在建设和运行期间，一旦发生近坝库岸或坝区滑坡事故，其危害将是十分严重的。岩石边坡问题应从工程地质勘测、稳定分析、监测、处理等 4 方面进行研究和处理。

岩石边坡工程地质勘测 目的是了解边坡的地层、岩性、构造、水文地质和物理地质现象，查明边坡边界条件、可能变形破坏的形式，通过试验求取评价边坡稳定的参数，预测边坡变形破坏的规模 and 特征及其对工程的危害性，为工程设计提出处理建议。

岩石边坡稳定分析 分析方法有力学分析、图解分析和工程地质比拟 3 种。

（1）力学分析。以岩石力学理论为基础，根据边坡边界条件和岩石物理力学参数，采用刚体极限平衡法、有限元法、离散元法和块体理论等进行边坡稳定计算。

（2）图解分析。包括求解边坡变形体边界条件和边坡稳定性两个方面。方法有以赤平极射投影原理为基础的实体比例

投影图解、根据岩体结构面的相互切割关系及边坡内滑动面倾角和其抗剪强度求变形体极限高度图解、评价边坡稳定和预测变形体极限高度图解三种。

（3）工程地质比拟。是应用自然历史分析方法去认识和了解自然边坡的工程地质因素，用以与人工开挖边坡的工程地质因素作对比，提出相似条件下的边坡稳定系数。这种方法在生产实践中常被采用。

岩石边坡监测 通过设置在边坡表面或内部的观测仪器，如位移计、测斜仪、挠度计、水压力计以及地面标点等进行定期测量，监视边坡变形和地下水变化状况及其发展趋势，为安全预报及工程处理提供依据。

岩石边坡处理 根据工程地质勘测、稳定分析和监测资料进行分析，在必要时进行处理，以确保边坡稳定。处理方法有：①清除表面风化岩石后做钢丝网喷混凝土层保护，防止岩石继续风化；②削坡顶、压坡脚，提高边坡稳定性；③采用合理的开挖方法（预裂爆破），减轻对边坡岩石的松动破坏；④锚杆、锚索加固或对裂隙岩体固结灌浆；⑤根据稳定要求，设置抗滑桩或挡

墙;⑥设截水和排水系统,防止地表水渗入边坡内;⑦在边坡内设排水孔(洞),形成排水系统,降低或消除地下水对边坡稳定的影响。

参考书目

中华人民共和国水利电力部科学研究所,中国科学院地质研究所. 水利水电工程地质. 北京: 科学出版社, 1974

湖南省水利水电勘测设计院. 边坡工程地质. 北京: 水利电力出版社, 1983

(黄仁福)

yanshi di ji

岩石地基 (rock foundation) 位于建筑物基础下承受建筑物载荷的岩体。对坝、水闸等水工建筑物而言,在建筑物自重、水压、温度、动力等载荷和渗透力作用下,岩石地基的变形、抗滑稳定性、承载能力、渗透稳定性都必须满足一定的安全要求,以保证建筑物的正常运行。

岩基变形 坝基岩体及拱坝坝头岩体在自重和外力作用下都要发生变形。由于岩体的非均匀性和各向异性以及地基中有断层、破碎带或软弱夹层等,通常易于发生不均匀变形,从而引起坝体应力变化,过大的不均匀变形可能使坝体产生裂缝,甚至导致人坝失事。特别是拱坝,坝体应力状态受坝头岩体变形的影响更为敏感。用土力学中计算沉降的方法可以进行岩石比较均匀及边界条件简单的岩基变形计算。用有限元等数值分析方法进行岩基变形计算能够灵活处理复杂边界条件、岩体的不均匀性和断层、层面和软弱夹层等不连续面,并能考虑岩体的初始应力、复杂的岩体本构关系和地下水的渗透作用。

岩基抗滑稳定性 坝基滑动破坏有沿坝体与岩石之间的接触面滑动和岩体内部滑动两种基本类型。特别是对于层状岩体或岩体中有软弱夹层和缓倾角软弱结构面时,有出现沿层面或软弱夹层滑动的可能性。对于混凝土重力坝,通常工程造价和安全取决于坝基抗滑稳定。对于混凝土拱坝,作用于坝面的大部分水推力都通过拱作用而传递给两岸坝头岩体,因此坝头岩体的稳定性至关重要。岩基抗滑稳定性可用刚体极限平衡理论估算,其安全度也可用有限元等数值分析方法估算。水库水在水头作用下向下游渗透,将增加岩基中可能滑动面上的渗透压力,从而降低坝基抗滑稳定性,计算中应予考虑。当前损伤力学、模糊数学和可靠度分析等新理论、新概念正在引入岩体稳定分析中。

岩基承载力 在保证岩基稳定和变形不超过允许值条件下岩基能够承受的最大载荷。岩基的变形(特别

是不均匀沉降)及抗滑稳定性是最大承载力的控制因素,其中以后者最为关键。因此岩基承载能力是决定坝体体型及尺寸、影响大坝安全和造价的重要因素,在坝工设计中要予以优化。岩基的应力、变形、抗滑稳定性、渗透稳定性以及与建筑物的相互作用,可以用同一种计算方法或不同计算方法的系列电子计算机程序进行计算。

岩基处理 对于复杂地基,在其承载能力不足时,或抗滑稳定性较差时,需要对岩基进行加固处理,处理的原则和方法见岩基处理。

(陆家佑)

yanshi gongcheng shuzhi fenxi

岩石工程数值分析 (numerical analysis in rock engineering) 对岩石工程问题进行应力和变形分析的数值方法。岩石工程包括地下工程、地面工程及其他工程学科中的有关课题。地下工程包括隧道、地下采矿坑道、地下厂房仓库、人防工事、核废料贮存等,要进行围岩稳定、支护设计、开采方法、加固措施、防爆性能、防止渗漏等分析。地面工程包括桥梁基础、高层建筑及重大建筑物基础、坝基、铁路公路路基岩质边坡、运河、露天矿等,需要评价岩体稳定、分析加固措施及开采方法等。在地震、石油、爆破等有关工程学科中,要研究岩体的断裂、动力作用、高温高压过程等。针对具体工程进行数值运算,得到各种课题的数值分析结果,据以对工程作出安全和经济评价,并确定设计方案和施工措施,是岩石工程数值分析的目的。近代计算机技术的发展,使过去无法用解析法求解的许多复杂工程问题,都可借助于数值运算求解,但计算结果的可靠程度取决于所采用的力学模型和参数。与以上工程领域相适应,数值计算的范围也极为广泛,常用的有有限元法、边界元法、离散元法,正在发展的还有切层图象法(Tomograph)、随机有限元法等。

有限元法 将岩体离散为有限元,建立虚功方程求解。此法在求解弹塑性、流变、动力、非稳态渗流等与时效有关的问题,以及求解温度场、渗流场、应力场耦合问题等复杂的非线性问题中的效能,已使它成为岩石力学领域中应用最广泛的数值分析手段。

边界元法 与有限元法平行发展的另一类数值方法,自20世纪70年代以来在岩石力学中的应用有了较大的发展。与有限元法不同的是它只需在边界上进行离散化,因而具有数据处理工作量小、占计算机内存少、解题时间短等优点。但在处理多种介质问题、非匀质问题、复杂的非线性问题以及模拟分类开挖及施工处理过程等方面,远不如有限元法方便和有效。

离散元法 将岩体作为不连续体的块体元分析

法。它不同于有限元及边界元之处在于离散元之间采用块体的接触作用模型。当两块体接触时,按其互相嵌入深度计算接触作用力 F_n , $F_n=K_n\delta_n$,式中 K_n 为接触弹性系数, δ_n 为嵌入位移。当两块体为面接触时,假定它有两个点接触;若非面接触时,则认为只有一个点接触。然后按每个块体建立动量方程,并进行时间域的离散,从而求出块体的变形状态。离散元法在求解地下洞室围岩稳定及岩坡稳定时颇见效用。

反分析 岩石工程与一般土建工程不同之处在于岩体存在于地应力环境中,岩体力学参数与地应力及外力相关联。对岩体工程进行数值分析时,除了由外载荷和地应力的已知条件分析岩体应力变形状态的正向分析外,还可以按现场试验或监测结果推算岩体工程存在的地应力和岩石力学参数,即岩石工程的反分析数值法。反分析法利用回归分析、模态识别、系统优化等数值方法,进行数值分析,可以为岩体工程提出可靠的分析参数与赋存环境。

(周维桓)

yanshi lixue

岩石力学 (rock mechanics) 研究岩石的应力、变形和破坏规律以及岩体的合理利用和加固处理的学科。这是一门力学、工程学和地学相结合的边缘学科。以岩体为研究对象时也称为岩体力学。岩石按其成因不同而分为岩浆岩、沉积岩和变质岩3大类,是组成岩体的基本材料。岩体是在漫长的地质年代里形成的,由岩石块体和各种结构面组成的有特定结构的,在人类工程活动影响范围内的那部分地质体。由于岩体具有明显的非均质、各向异性、非连续性,内部存在初始应力,且其性质随时间和赋存环境而变化,故远较其他材料复杂。在岩石(体)力学的研究中应充分考虑这些特点,采用基础理论和应用技术相结合的途径,建立能模拟岩体实际情况的实验和分析方法,重视原型观测和工程实录,以解决工程实际问题。

研究内容 现代岩石力学的研究范围已从单纯的岩石工程,扩展到地学、地震学、地球动力学、构造物理、震源力学等领域。岩石工程也深入到地下工程围岩、建筑物地基和岩石边坡、石油开采、核废料贮存、水库诱发地震等众多方面。主要研究内容和应用领域有:

(1) 岩石力学的地质基础研究。如构造物理、不连续面特性、地应力场、渗流场、地温等。

(2) 天然岩石及其不连续面的力学特性及本构关系的研究。包括应力、应变、围压、时间、温度、相变等。

(3) 天然岩体的水理特性。包括渗透性、溶蚀性、

崩解软化等。

(4) 天然岩体的动力特性。包括加载速率、粘滑、循环载荷、反复剪切、应力波传播规律等。

(5) 天然岩石的热学特性。包括低温岩洞贮藏天然气问题、高温岩石隧洞的设计与施工问题等。

(6) 岩石测试技术及监测技术研究。包括室内及现场试验、原型观测、施工监测等方面,要研究采用遥感遥测、高温高压、层析成象(CT)等新技术,研究施工安全监测与反馈信息在设计上的应用。

(7) 工程建设中的岩体稳定性问题。包括坝基、岩石边坡、地下洞室围岩等方面,研究数值分析方法及其在工程中的应用。

(8) 岩石力学的耦合分析。包括固体-液体-热的耦合分析,这涉及水库诱发地震、核电站的核废料处理、地热发电以及与地震有关的深部岩石特性的研究等课题。

(9) 天然岩体的充分利用及加固处理。包括在各类工程中充分利用围岩的自承能力,考虑衬砌结构与岩体的相互作用;岩石开挖过程中的支护工作;岩体的加固和防渗处理措施等。

(10) 工程实例的总结和反分析。包括对成功和发生事故的实际工程进行调查研究和反分析,评价工程安全性,并提高设计和施工水平。

(11) 岩石工程问题辅助决策的专家系统。

研究方法

(1) 天然岩体地质条件的宏观分析。分析影响岩体稳定性的关键地质薄弱环节、地下水流及地应力状况、断裂构造及节理系统的产状及性质、各种物理地质现象等问题。

(2) 岩石力学性质的测试及资料的整理分析。必须在宏观地质分析的指导下选择试验和取样部位,设计试验项目和内容,揭露岩石的变形和破坏机理,确定力学模型及各项参数值。

(3) 特定条件下的物理模型试验,特别是地质力学模型试验及离心模型试验,把岩石力学试验上升到场的尺度范围,认识岩体的总体工作状态及破坏机制,验证分析方法的可靠性,并赖以建立新的分析方法并取得参数值。

(4) 岩石力学分析。包括解析法和数值法。详尽的地质分析是重要的一环,但地质因素仅提供了某种破坏的潜在可能性,工程载荷及边界条件等几何和力学的因素对破坏也起决定性的作用,施工方法和开挖程序对岩体稳定性也有影响。因此在一定地质条件下,要通过数学方法对岩体进行力学和力学过程的分析,计算其应力、变形和破坏条件,以解决实际工程问题。

(5) 施工过程中的监测、监控及反馈分析。用于监

控工程安全,验证工程设计是否合乎实际情况,并用信息反馈指导次一循环的设计和施工。

形成与发展 可大致分为奠基时期和发展时期两个阶段。

(1) 奠基时期。在古代,天然岩石主要是用作建筑材料和矿石。世界上许多著名的古建筑都是用石料建造的。因为挑选坚硬新鲜的岩石切割成形,避开天然节理裂隙及风化的部分,其强度必有保证,所以对其力学特性的研究并不太迫切。岩石力学特性的研究最初是由采矿工程的需要而发展起来的。在 20 世纪初,由于矿山、水工、交通建设的需要,提出了地下洞室围岩稳定性、高坝岩基及岩质边坡稳定性等一系列课题。近代技术提供了岩石力学科学试验的手段,出现了岩石三轴试验、隧洞水压法和平板千斤顶法、原位岩体应力测量等测定岩石力学特性参数的技术。在这个阶段,岩石力学的研究领域多局限于山岩压力和矿坑支护方面,还习惯于单纯依靠岩石试件的试验室试验结果来评价天然岩体,在理论上常用连续介质力学作为解决各种岩石力学课题的基础。对于天然岩体的力学模型,既认为连续介质模型不适合于结构面切割的天然岩体,而对非连续介质模型又缺乏有效的研究手段。因此在这一阶段还不可能形成岩石力学的理论体系。

(2) 发展时期。20 世纪 60 年代以来,由于工程建设的急速发展,提出的岩石力学问题的规模和难度都达到了新的水平。特别是 1960 年前后,法国的马尔帕塞(Malpasset)薄拱坝因坝基岩石破坏而失事;意大利的瓦依昂(Vajont)拱坝因上游山坡塌滑入水库中,使库水漫过坝顶造成下游生命财产的损失。这两次事故在工程界引起很大震动,从而更加重视岩石力学的研究工作。在这种背景下,国际岩石力学学会(International Society of Rock Mechanics, ISRM)于 1962 年在萨尔兹堡建立,并于 1966 年在葡萄牙的里斯本举行了第 1 届国际岩石力学大会,至今已召开了 6 届,推动了岩石力学的发展。

在这一阶段,连续介质模型和非连续介质模型在争论中得到发展,并有互相结合的趋势。前者从整体着眼,认为岩体虽是断裂的,但只要宏观上具有确定的应力应变关系,就可以用连续介质力学方法去求解其应力和变形状态。后者的基本观点是岩体内部地质断裂系统对天然岩体工程性质的影响远大于岩石本身强度,岩体强度和变形及其各向异性都受岩体中块体单元间的相互联系及内部位移的制约,因此岩石力学应是不连续介质力学。他们从岩体内部结构着眼,把天然岩体简化为某些不同性质和几何形状的块体的集合体,进而研究这些块体单元和不连续面的应力应变关系和破坏机制,再去求解有关的岩石力学问题。当前,

不连续介质力学还有许多问题有待解决,然而由于电子计算机和数值方法的发展,以及对裂隙岩体的大量试验研究和理论分析,使连续介质力学也能在不同程度上考虑岩石中的不连续面,即对不均匀岩体中的不连续面以及被它们分隔的岩块分别用连续介质力学处理,然后用适当的相容条件将它们联系起来,因此在解决工程实际问题时,两者已经没有明显差别了。

在这一时期对岩石力学发展和理论体系的形成有重大影响的因素有:①岩体赋存的地质背景对岩石工程的深刻影响逐步为人们所接受,并积累了大量软弱结构面及包含不连续面在内的地质单元工程特性的试验研究资料;②地球动力学、构造地质学、塑性力学、流变学、断裂力学、渗流力学等相关学科的不断渗入,使岩石力学的理论分析和研究内容日益丰富;③地震法、声波速度测定、声发射、刚性压力机、高温高压三轴仪以及现场应力及变形观测等新技术的应用,提高了对岩石性质的测试能力;④电子计算机的应用促使有限元、边界元、离散元、块体理论等分析方法飞速发展,使岩石力学分析可以采用较为符合实际情况的模型和方法,提高分析成果的可靠性和工程设计的水平,并带动可靠度分析、模糊数学、损伤力学等新兴学科在岩石力学中的应用。

中国岩石力学起步较晚,但起点较高。从 20 世纪 50 年代开始,为适应工程建设的需要,建立了岩石力学与岩石工程学科,一开始就把重点放在岩石的原位试验和原型监测方面,并和工程地质研究密切配合,结合重大水利水电、矿山、交通等工程的勘测、设计和施工进行研究,在岩体结构、块体理论、岩体应力、岩石流变、岩石断裂等方面都有创造性的贡献。岩石力学试验的技术和仪器设备也都陆续建立,现已配套并配备现代化的量测和数据处理设备。

参考书目

塔罗勃 J 著,岩石力学,林天健等译,北京:中国工业出版社,1965

(Talobre J. La Mécanique des Roches, Paris, Applique aux Travaux Publics, 1957)

(陶振宇)

yanshi lixue xingzhi

岩石力学性质 (mechanical properties of rock)

岩石在各种受力状态下所表现出的变形和抵抗破坏的特性。通常包括静态和动态下岩石的抗压强度、抗拉强度、抗剪强度、弹性(变形)模量、剪切模量和泊松(S. -D. Poisson)比等,可以在试验室或现场用一定仪器设备测定。它们都是岩石工程所必需的力学参数,对工程的安全性和经济性有重要意

义。

岩石抗压强度 试件在试验室或现场的无侧限条件下进行轴向压缩时所能承受的最大压应力。如以 p 代表破坏载荷, A 代表试件横断面积, 则抗压强度 $R_c = p/A$ 。工程上常分别测定干燥和水饱和状态下的抗压强度, 后者与前者之比值恒小于 1, 称为软化系数, 该数值愈小, 表示岩石的抗水性愈差。

岩石抗拉强度 试件在单向拉伸时所能承受的最大拉应力。试验方法有直接法和间接法, 前者与抗压强度试验类似, 试验得出轴向拉伸的破坏载荷后, 以公式 $R_t = p/A$ 计算抗拉强度 R_t ; 后者多用劈裂法, 即以圆柱形试件在压力机上进行径向劈裂, 得出破坏载荷 p , 其计算式为 $R_t = 2p/(\pi DL)$, 式中 D 和 L 分别为试件的直径和长度。岩石的抗拉强度一般仅为其抗压强度的 1/10。工程上对有裂隙的岩体往往不考虑抗拉强度的存在。

岩石抗剪强度 岩石抵抗剪切破坏的能力, 即试件在二轴或三轴条件下剪切面上的极限剪应力。工程上多采用一组试件 (3 个以上) 通过直剪或三轴试验来获得岩石抗剪强度包线, 如图 1 所示。当抗剪强度 τ 与

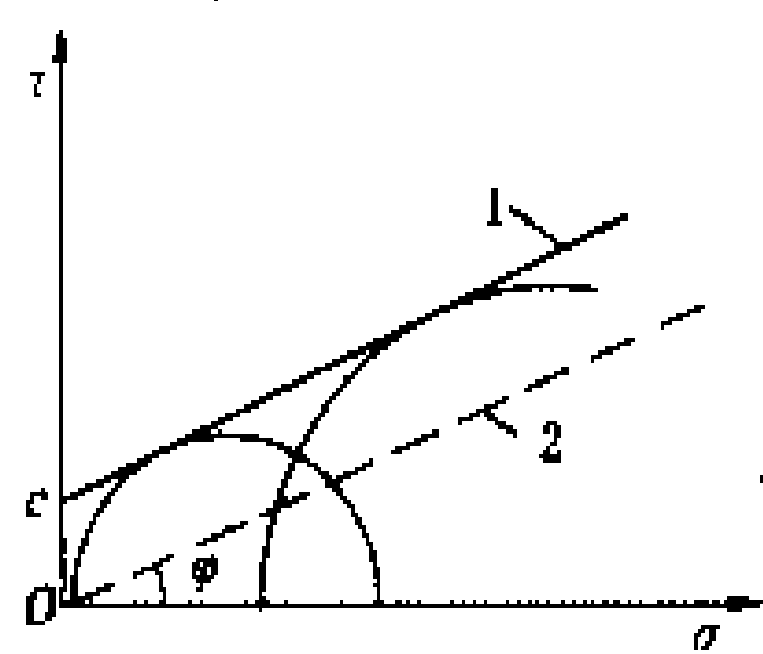


图1 岩石的抗剪强度包线

法向应力 σ 呈线性关系时, 抗剪强度可用下式表达: $\tau = \sigma \tan \varphi + c$, 式中 c 为垂直轴上的截距, 称为粘聚力; φ 为强度包线的倾角, 称为内摩擦角。岩石的三轴试验结果表明, 其 $\tau - \sigma$ 关系并非线性, c 、 φ 值与应力状态有关。在岩石力学分析中按剪切过程又将抗剪强度分为峰值强度和残余强度, 前者为最大剪切强度, 后者是岩石大变形后的最小剪切强度, 见图 1。工程是长期承载的, 往往还要考虑岩石的长期强度。对有软弱面存在的岩石, 常以该软弱面为剪切面, 进行直剪试验求出其抗剪强度。

岩石弹性模量和变形模量 在单轴受力下岩石轴向应力 σ 与轴向应变 ϵ 之比。当岩石的应力应变曲线为直线关系时, 以模量 $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ 表示。若加载和卸载时变形路径相同, 则岩石呈弹性性质, 称 E 为弹性模量; 如果加载与卸载时的变形路径不同, 出现滞后环, 如图 2 中线 1 和线 2 所示, 则将出现永久变形 ϵ_0 , 并可分为加载模量 (图 2 中线 1) 和卸载模量 (图 2 中线 3)。通常根据一次卸载曲线的割线 (图 2 中线 2) 来确定弹性模量。如果采取一次加载的全变形 ϵ 来计算模量, 则称其为变形模量。

岩石泊松比, 或称泊松系数, 为单轴应力下所引

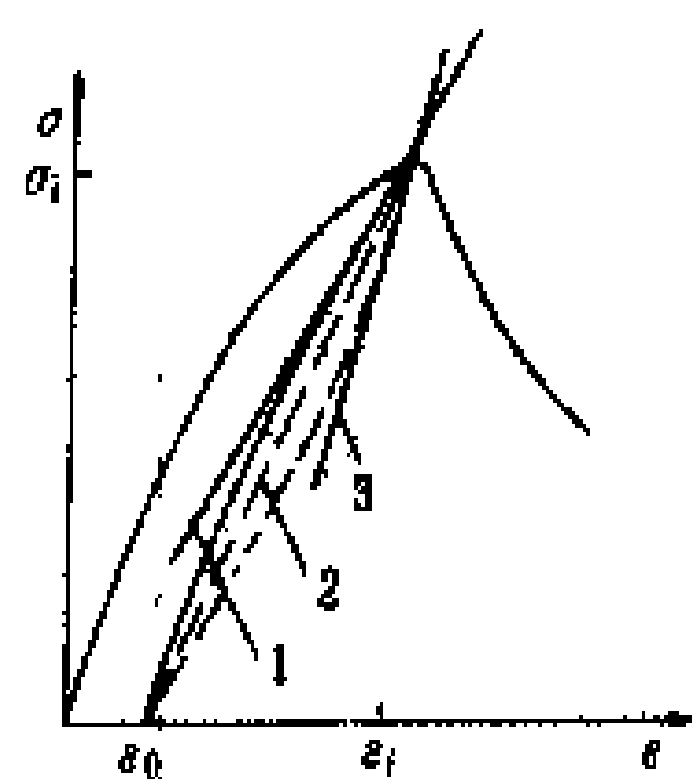


图2 岩石的应力应变关系曲线

1—加载模量线; 2—卸载割线; 3—卸载模量线; ϵ_0 —永久变形

起的侧向应变与轴向应变之比。该系数小于 0.5。它与岩石弹性 (变形) 模量是岩石工程应力分析中不可少的两个参数, 近年还常通过测定岩石的波速来求出这两个参数。

岩石剪切模量 剪切

应力与剪切位移曲线上的一个参数, 以 $G = \tau/\gamma$ 来

表达, 式中 τ 为剪应力, γ 为单位剪切位移。它与弹性模量和泊松比有关。在

各向异性岩石工程的数值计算中往往需要此参数。

蠕变和扩容 岩石的变形随时间而变化的现象称为蠕变。在加荷条件下, 岩石内因微裂隙扩张而引起的体积增大现象称为扩容。蠕变和扩容都是评价岩体稳定性的重要依据, 但不同岩石表现不一, 各种坚硬岩石 (如花岗岩) 往往蠕变量很小, 一般可不考虑, 但要重视其扩容; 而各种软弱岩石 (如粘土岩), 其蠕变量一般较大, 工程上常要加以考虑。

岩石力学性质的影响因素 主要有成因和组成 (如矿物成分、结晶情况、颗粒大小、孔隙率、胶结情况)、湿度和温度、各向异性、试件形状及尺寸、不连续面发育程度和性质等。

(1) 成因及组成。组成岩石的矿物本身强度愈大, 岩石的强度和模量愈高。通常岩浆岩强度最高, E 值最大。细粒岩浆岩的强度比粗粒岩浆岩高。孔隙率大和风化严重的岩石强度和模量较小。沉积岩的强度和 E 值较低, 且与其胶结情况有关, 如硅质胶结的岩石强度和模量较高, 钙质胶结次之, 泥质胶结最差。

(2) 湿度与温度。各类岩石的强度均随温度和湿度增高而降低, 尤其是泥质岩石 (粘土岩、页岩等) 受水浸润会发生软化而丧失其强度, 模量值一般亦随温度升高而降低。

(3) 各向异性。岩石的强度和变形性质多具有明显的各向异性, 它主要取决于岩石的层理 (或片理) 和节理分布。一般当力与层理或节理面平行时, 其抗压强度高, 抗拉强度和抗剪强度较低, 模量最大; 力与层理或节理面垂直时, 则相反。

(4) 试件形状及尺寸。圆柱体试件强度小于立方体试件强度, 且试件高径比愈大, 其强度愈低。

(5) 不连续面状况。岩体的强度与变形往往取决于裂隙等不连续面出现的频率及其性质 (连续性和充填情况), 它与小试件的试验结果常有显著差别, 因此, 工

程上多重视进行现场岩石试验（见岩体力学性质现场试验）。

参考书目

耶格 J C, 库克 N G W. 岩石力学基础. 中国科学院工程力学所译. 北京: 科学出版社, 1981

(Jaeger J C, Cook N G W. Fundamentals of rock mechanics. 3rd edition. London: Chapman and Hall, 1979)

(叶金汉)

Yantan Shuidianzhan

岩滩水电站 (Yantan Hydropower Station)

红水河梯级水电站中的第五级。位于红水河中游广西大化瑶族自治县境内, 东南距巴马县 30 km, 距南宁市 170 km。上游 166 km 接计划兴建的龙滩水电站, 下游 83 km 与大化水电站相接。电站以发电为主, 兼有航运效益。一期工程装机容量 1210 MW, 保证出力 245 MW, 多年平均年发电量 56.6 亿 kW·h。用 500 kV 电压供电给广西和广东。拦河坝, 部分为混凝土重力坝, 最大坝高 110 m; 部分为碾压混凝土坝, 最大坝高 106 m。水库淹没耕地 47139 亩, 迁移人口 36435 人。工程于 1985 年 3 月开工, 1992 年 9 月第一台机组发电, 1993 年 8 月第二台机组发电。

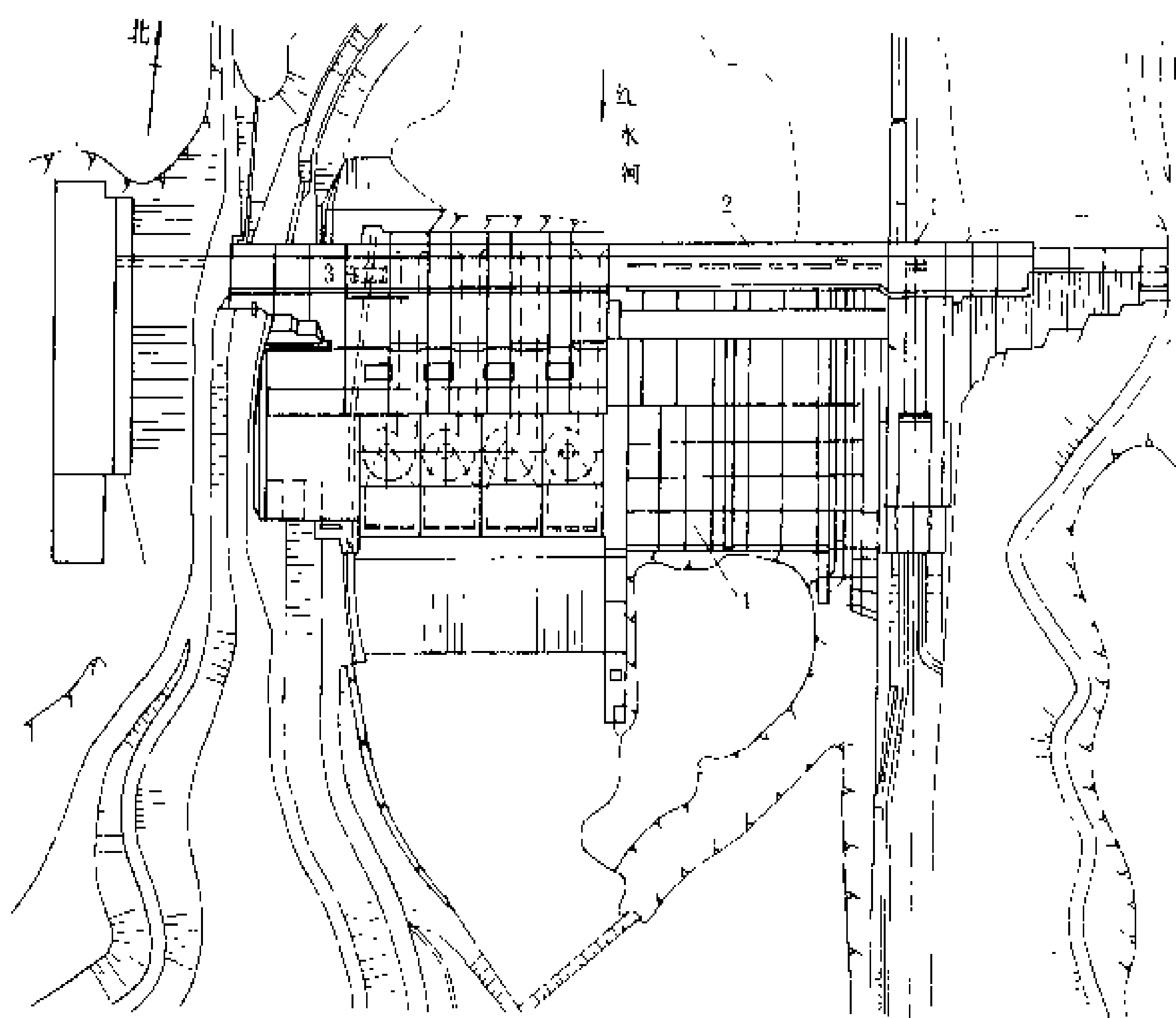
水文和水库特性 坝址上游流域面积 106580 km²。多年平均流量 1760 m³/s, 多年平均年径流量 555 亿 m³。工程按千年一遇洪水 30500 m³/s 设计, 五千年一遇洪水 34800 m³/s 校核。设计洪水位 227.2 m, 最大下泄流量 28980 m³/s; 校核洪水位 229.2 m, 最大下泄流量 33380 m³/s, 相应总库容 33.5 亿 m³。正常蓄水位 223 m, 相应库容 26.0 亿 m³。近期运行, 死水位 204 m, 死库容 10.4 亿 m³, 调节库容 15.6 亿 m³, 为年调节水库。上游龙滩水电站投入后, 死库容 21.7 亿 m³, 调节库容 4.3 亿 m³。

枢纽布置 水库地处相对稳定块, 地震基本烈度为 6 度。坝址区地层为岩浆岩, 坝基主要为粗晶菊花状

辉长辉绿岩, 岩石强度高, 未发现大的断裂构造。枢纽由混凝土重力坝、右岸坝后式厂房、通航建筑物和高压开关站等建筑物组成, 见图。

重力坝坝顶高程 233 m, 最大坝高 110 m, 坝顶长 525 m。溢流坝段设 15 m×21 m (宽×高) 的表孔 7 孔, 堰顶高程 202 m, 采用宽尾墩与屏式消力池联合消能。在 18 号坝段设置 5 m×8 m (宽×高) 底孔 1 孔, 进口底坎高程 176 m, 采用挑流消能。

一期厂房位于右岸坝后, 安装 4 台 302.5 MW 机组。水轮机为混流式, 转轮直径 8.0 m, 最大水头 68.5 m, 最小水头 37 m, 额定水头 59.4 m, 额定转速 75 r/min, 额定出力 307.1 MW, 最高效率 94.4%, 设计点效率 91.2%。发电机为空冷半伞式, 额定电压 15.75



岩滩水电站枢纽平面布置图

1—升船机; 2 溢流坝; 3—厂房; 4—消力岸

kV, 额定容量 345.7 MV·A, 额定功率因数 0.875。引水钢管直径 10.8 m。高压配电装置采用气体绝缘金属封闭电器。

通航建筑物设于溢流坝段底孔左侧, 采用均衡重式垂直升船机, 过船吨位 250 t, 年货运量 180 万 t。

工程施工 枢纽建筑物一期工程量为土方明挖 338 万 m³, 石方明挖 676 万 m³, 混凝土 342 万 m³, 金属结构安装 21000 t, 帷幕灌浆 5.83 万 m, 固结灌浆 9.09 万 m。对外交通采用公路。采用左岸明渠导流、大基坑全年施工方案。

设计和建设单位 广西壮族自治区电力工业局勘测设计院设计。业主单位: 广西壮族自治区电力工业



局。甲方管理单位：广西岩滩水电站工程建设公司。乙方单位：广西水电工程局、葛洲坝工程局、水利电力部第四工程局等。

(侯建功)

yan ti feng hua

岩体风化 (weathering of rock mass) 在自然条件下,地表岩体遭受太阳、水、空气和生物等作用而发生的物理性质和化学性质的变化。岩体风化以后,强度降低,完整性变差。

岩体风化作用 可以分为物理风化作用、化学风化作用和生物风化作用。①物理风化作用是岩体受气温变化、冻融和盐类结晶等作用而产生的机械破碎。物理风化基本不改变岩石的化学成分,但为化学风化作用的深入发展创造了有利条件。②化学风化作用是岩石与水、氧、二氧化碳以及各种酸类发生化学反应所引起的岩石和矿物的化学成分的变化,并可形成新的矿物。③生物风化作用是指岩体在生物活动的影响下,所引起的破坏作用。如植物根的生长使岩体遭受机械破坏;生物腐烂和微生物作用使岩体产生化学分解。

风化岩体的形态 按风化岩块的形状可分为碎块状风化和球状风化;按风化岩体的产状又可分为表层均匀风化、带状(或层状)风化和囊状风化等。①碎块状风化。风化营力沿多组裂隙侵入,使岩体风化成碎块或碎片状。②球状风化。等粒状岩体、厚层或块状岩体被裂隙切割成立方体,风化营力使立方体棱角碎裂消失,由表往里,层层剥离后形成球形。③表层均匀风化。在构造、岩性均匀地区,风化营力沿均匀分布的裂隙侵入,使地表相同深度处岩体的风化程度相接近。④带状风化。构造、岩性不均匀地区,岩体抗风化能力不等,风化作用沿易风化的岩层、断层带或岩脉进行,风化岩体呈层状或带状分布,也有称此为差异性风化。⑤囊状风化。风化作用沿两条或两条以上断层或节理密集带交汇处进行,风化岩体呈囊状分布。

岩体风化程度 一般可分为全风化、强风化、弱风化和微风化。①全风化。母岩的组织结构已完全破坏,仅外观保持原岩状态,矿物成分除石英外,大部分风化变质,颜色已全部改变,光泽消失,锤击呈哑声,浸水崩解,物理力学特性与土体近似。②强风化。外观具原岩组织结构,但裂隙发育,岩体呈干砌块石状,岩块上裂纹密布,疏松易碎,易风化矿物均已变质,其他矿物仍有部分保持原矿物特征,锤击呈哑声,物理力学性质显著变差,变形模量小,抗剪强度低。③弱风化。岩体组织结构大部完好。但节理面风化明显,出现次生、风化矿物,沿节理面大部改变颜色,但岩块中部仍保持新鲜岩石特点。锤击发声不够清脆,物理力学性质有所降

低。④微风化。组织结构未变,除构造节理外,一般风化裂隙不易察觉,沿节理面有时有铁锰质渲染,节理面略有变色,锤击发声清脆,物理性质几乎不变,力学强度略有降低。

(赵鹤勤)

yan ti jie gou

岩体结构 (structure of rock mass) 岩体中结构面与结构体的组合。结构面是指层理、片理、断层、节理等各类破裂面,结构体指各类结构面切割形成的岩块。目前中国各个单位对岩体结构的划分并不完全一致,主要有整体块状结构、层状结构、碎裂结构和散体结构四大类。

(1)整体块状结构。岩性单一,构造变形轻微,岩体内结构面少而不连贯,延伸不长,组数少,多闭合。根据岩体的完整程度又可分为整体状结构和块状结构。①整体状结构。岩性单一的巨厚层沉积岩、变质岩和岩浆岩,岩体内结构面稀少,间距大于1m。除喀斯特化岩层外,一般不透水。岩体变形模量大于 15×10^3 MPa,变形特性接近均质弹性体。整体强度高,岩体稳定性好。②块状结构。岩性单一的中~厚层沉积岩、变质岩和岩浆岩,岩体内结构面少,间距0.5~1m。除喀斯特化岩层外,一般也不透水。岩体变形模量大于 $(5 \sim 10) \times 10^3$ MPa,比整体状结构岩体稍小,变形特性较接近均质弹性体。岩体强度高、稳定性好,但比整体状结构岩体稍差。

(2)层状结构。岩体被一组发育的延伸长的结构面(层理、片理等)切割成层状或板状。根据岩层厚度又可分为层状结构和薄层状结构。①层状结构。中~厚层的层状岩层,构造变形轻,结构面间距30~50cm,一般层间结合不好,结构体多为较规则的长方体或厚板状体,岩体一般不透水,岩体的变形模量 $(5 \sim 10) \times 10^3$ MPa,垂直层理方向的变形模量小,平行层理方向的大。岩体的抗剪强度则相反,垂直层理方向的大,平行层理方向的小。岩体呈明显的各向异性。岩体的稳定程度视作用力与层理方向夹角的大小以及作用力的大小而定。一般岩体稳定性较差。②薄层状结构。岩层厚度小于30cm的层状岩层,构造作用的影响中等,层理、片理发育,层间错动明显,有软弱夹层与泥化夹层,结构体多为厚薄不等的板状体,岩体的变形模量 $(1 \sim 5) \times 10^3$ MPa,岩体的变形与抗剪强度特性与层状结构岩体相似,呈明显的各向异性。岩体的稳定性较层状结构岩体差。

(3)碎裂结构。岩体被多组发育的结构面(断层、节理、层理、片理等)纵横切割成碎块状。构造变形强烈,结构面间距小于50cm,一般为数厘米,结构体

多为形态不同的大小碎块。透水性一般都很大,透水量与裂隙张开程度、充填物性质、裂隙多少有关。岩体的变形模量一般为 $(1\sim 3)\times 10^3$ MPa,岩体强度较低,稳定性差。常需进行工程处理。

(4)散体结构。岩体被多组发育结构面纵横切割成极小碎块。岩体经强烈构造变动和强风化作用影响裂隙张开的部分充填有粘性土,结构面间基本上无粘结力。如大断层带、全风化带、岩脉蚀变接触带。岩体透水性强,但压性断层有时不透水,岩体的变形模量小于 0.5×10^3 MPa。岩体完整性差,强度低,接近松散体,稳定性差,不宜布置大型水工建筑物。

各种岩体结构的工程地质特性目前还不能单从岩体结构的划分来进行定量评价。这只是一个定性的分类。因此在分析评价各种岩体结构对工程的稳定时,应根据建筑物的种类、型式、规模,结合岩体的岩石强度、结构面特征和它的力学参数,以及各种结构面的组合关系,岩体受力状态进行分析计算。有时还需辅以地质力学模型试验和原位监测进行论证。

(赵鹤勤)

yanti lixue xingzhi shiyan

岩体力学性质试验 (test for mechanical properties of rock mass) 见岩石力学性质。

yanti lixue xingzhi xianchang shiyan

岩体力学性质现场试验 (in-situ test for mechanical properties of rock mass) 在现场的试验洞、基坑或钻孔中测定岩体强度、变形和渗透性能的实验技术。地应力测试也是一种岩体现场试验。通过现场试验,可以更好了解和掌握岩体的力学性质,为工程提供更为符合实际的设计参数。

岩体强度试验 包括抗压强度和抗剪强度。①岩体抗压强度试验。测定岩体在轴向压力作用下抵抗破坏的能力。试件尺寸一般为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 100\text{ cm}$ 的棱柱体,底部不切开,用千斤顶或液压枕加轴向力直至破坏,并由此求得抗压强度。如试件侧面不加压,则称为无侧限或单轴抗压强度;如侧面施加一对或两对侧向压力再进行试验时,称二轴或三轴压缩试验,可测定岩体在不同应力组合下的强度特性。②岩体抗剪强度试验。测定岩体中软弱结构面以及混凝土与岩体接触面的抗剪强度。试验方法有直接剪切法和扭转剪切法两种。前者试件面积一般为 $70\text{ cm}\times 70\text{ cm}$,剪切面上试件高度为 35 cm ;后者采用直径为 $5\sim 30\text{ cm}$ 的金刚石岩心钻钻到预定剪切面以下。一组试件不少于3个,在不同法向应力下进行直剪或扭转试验。根据试验结果绘制剪切应力与位移的关系曲线,取剪应力的峰

值经作图或计算求出岩体抗剪强度参数。也可取剪应力的残余值,求其残余抗剪强度参数。

岩体变形试验 测定岩体在压力作用下的变形性质,包括弹性模量或变形模量和泊松比。试验方法有承压板法、径向千斤顶法、隧洞水压法和钻孔变形计法等。①承压板法有表面和孔底两种。承压板有刚性(厚钢板)和柔性(液压枕)之分。表面承压板直径 100 cm ,孔底承压板直径不小于 50 cm 。用千斤顶或液压枕向岩体逐级加荷,同时用百分表或位移计测量压缩和侧向变形。根据试验结果绘制压应力与变形关系曲线,计算变形性质指标。②径向千斤顶法,用千斤顶或液压枕向隧洞周围岩体作径向加压,用百分表或遥测位移计测量岩体变形,根据试验结果绘制压应力与变形关系曲线,求得岩体径向的各个变形性质指标。③隧洞水压法是将一段圆形隧洞封堵成试验段,用泵将水注入其中向岩体加压,用遥测位移计测量岩体变形。试验中在岩石界面上的应力条件与径向千斤顶法类同,整理资料方法也相同。④钻孔变形计法是将橡皮囊置于钻孔中的测试部位,用泵向橡皮囊内逐级加压,借助于装在囊中的遥测位移计测量孔径变化。根据压应力与孔径变化关系曲线,求得各径向岩体变形性质指标。

岩体渗透试验 测定水或其他液体在岩体中流动的能力,有压水和抽水两种试验方法。①压水试验,常用于裂隙岩体。在钻孔中用止水塞分隔成一试验段,用泵向试验段内压水,测定一定时间内渗入岩体的水量,据以计算岩体渗透性指标单位吸水量 ω ($\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}\cdot\text{m}$)或吕荣(Lugeon)值($\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}\cdot 100\text{ m}$),由 ω 值也可近似地推求岩体渗透系数 k 值(cm/s)。②抽水试验,适用于地下水埋藏较浅的情况,有单孔抽水和群孔抽水两种。根据抽水时间、地下水位变化及透水岩层埋藏条件等,计算岩体渗透系数 k 值。

(黄仁福)

yanti moxing shiyan

岩体模型试验 (model test of rock mass)

根据力学相似和几何相似原理,以模拟材料制成模型,进行岩体力学试验的实验技术。通过测量加载下模型的应力和变形,研究坝基、地下洞室、边坡等岩体的应力分布和破坏形态及其对工程结构的影响,为工程设计和施工提供依据。岩体模型有结构模型(包括脆性材料模型和光弹性模型)和岩体地质力学模型两类。岩体模型试验成果受许多因素影响,其中模拟材料的选择与制作工艺是决定性因素,其次试验设备与测试仪器、试验程序和方法、试验室的温度与湿度等均属不可忽视的条件。

结构模型



(1) 脆性材料模型试验。常用石膏、砂、硅藻土、浮石、水泥等材料,按静力相似律要求,配制质地均匀、性能稳定和易于加工的模型材料制作模型,放在试验架上进行试验。在试验过程中利用各种测量元件量测各测点的应力或变形。近年来已有应用激光散斑技术测量岩体模型的全场变形的办法。(见脆性材料水工结构模型试验,全息散斑水工结构模型试验)

(2) 光弹性模型试验。用具有光学灵敏性的材料(如赛璐珞、明胶、环氧树脂等)制成模型,放在光弹仪上,利用双折射效应和偏振光原理,将模型受力变形所产生的干涉条文(即等色线和等倾线)测出,从而可算出模型内各点的应力。光弹性模型试验又可分为光弹性应力冻结法和全息光弹性法。(见光弹性试验,全息散斑水工结构模型试验)

地质力学模型试验 以模拟控制岩体力学性质的各种地质构造面(如节理、断层、软弱夹层等),测定模型受力时的应力和变形,研究其破坏形态和机制。它能较直观地为工程设计和岩体加固处理提供合理依据,尤其适于查明地下洞室开挖顺序影响和洞群合理布置。它是非均质不连续岩体强度理论研究的一条重要途径。制作地质力学模型时要选择重量大、弹性模量低的材料,通常选用重晶石粉、铅丹、石英砂和铁粉等为骨料,以硅藻土、膨润土为掺合料。块体间摩擦可以用塑料薄膜、纸或甘油模拟,断层充填物用石膏、淀粉、软胶等材料。对喷锚支护的地下洞室模型,常以铅丝、铜丝、铝丝和竹等材料模拟锚杆,以石膏、乳胶水等模拟喷层。模型相似律与脆性材料模型相同,并要求模型与原型的应变和摩擦系数尽可能一致。

目前多用平面模型试验,将模型安置在试验架上,以橡皮囊装满液体(水或水银)施加而力,也可用小千斤顶分块施加集中力代替。自重应力由模型材料自重形成。以千分表或其他应力和应变传感器布置在模型表面或内部量测试验过程中的应力和应变。对砌块模型的两侧常以有机玻璃板夹住,以防失稳,但要采取相应的减摩措施。

试验时按要求加载或开挖洞室,并测量模型各测点的变位,观察模型的破坏形态。通常以位移与时间曲线上的突变点为控制点,取超载安全系数作为评价岩体稳定的标准。

(叶金汉)

yanti ruanruo jiegoumian

岩体软弱结构面 (weak structural plane of rock mass) 岩体中力学强度明显低于围岩的结构面,常对岩体稳定起控制作用。软弱结构面按成因一般可分为原生软弱结构面、构造软弱结构面和次生软

弱结构面三种类型。岩体中各种软弱结构面相互切割易形成对岩体稳定不利的组合。有时岩体虽较完整,岩块强度也很高,但由于存在结构面的不利组合仍易于失稳。因此在评价各种软弱结构面对岩体稳定的影响时,还考虑建筑物的种类、规模、作用力的大小与方向并结合软弱结构面组合的形状及其力学参数进行分析研究。

原生软弱结构面 在成岩过程中形成的软弱结构面。其中又可分为沉积岩结构面、岩浆岩结构面和变质岩结构面。①沉积岩结构面。如层面、韵律沉积中的泥质物质、沉积间断面、成岩节理以及火山碎屑岩中的软弱矿物富集带等。②岩浆岩结构面。如侵入岩两侧的接触面与蚀变带、流层、喷出岩的间歇喷发接触面以及原生节理等。③变质岩结构面。变质岩中片麻理和片理以及软弱矿物富集带等。原生软弱结构面的产状比较稳定有规律,岩体工程地质特性呈各向异性,如平行层理或片理方向与垂直层理或片理方向的透水性、变形模量、抗剪强度相差很大。

构造软弱结构面 岩体受构造应力作用所产生的软弱结构面。如断层、劈理、构造节理以及由层间错动形成的软弱夹层等。构造节理不象层面一样只有一组而同时发育有多组。扭性节理面光滑、延伸长、抗剪强度较小;张性节理面粗糙、延伸短、抗剪强度较大。断层在岩体中出现的频率不如节理高,也不似节理那样均布于整个岩体中。但断层规模大,延伸长,在变形、抗滑稳定方面常起控制作用。

次生软弱结构面 岩体中由于风化、卸荷和地下水等次生作用所形成的软弱结构面,如风化夹层、泥化夹层、风化裂隙、边坡重力裂隙以及卸荷裂隙等,这些软弱结构面多数渗透系数大、变形模量小、抗剪强度低。

(赵鹤勤)

yanti weiyi jiance

岩体位移监测 (monitoring of rock mass displacement) 见岩体原位观测。

yanti wendingxing

岩体稳定性 (stability of rock mass) 岩体在应力长期作用下发生不丧失岩体结构承载能力的变形的宏观状态。岩体稳定性主要是研究岩体是否会发生重大的失稳事故。岩体赋存于自然界,在历史上不断经受各种自然力作用和人类活动的影响,从而在某些岩体中可能出现山体崩塌、河岸滑坡、地下洞室围岩塌方、大坝地基破坏等失稳状态。近年来,岩土工程的规模日趋增大,工程条件日益复杂,岩体稳定性的研究



更加引起岩土工程界的注意。如1959年12月2日,法国马尔帕塞(Malpasset)双曲薄拱坝,由于坝基失稳而导致整个拱坝顷刻间倒毁, $49 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的洪水下泄,对下游造成重大损失,致使400余人死亡。1963年10月9日,意大利瓦依昂(Vajont)水库岩坡由于石灰岩层面强度减弱而发生大规模滑坡,在1 min内大约有近3亿 m^3 的岩石崩塌入水库,造成高达150~250 m的水浪,漫过265 m高的拱坝,致使下游的市镇遭到毁灭,2500人死亡。

岩体稳定性判据 以狄利克雷(Dirichlet)准则为判据,即稳定性取决于岩体势能即自由能驻值的性质。当岩体的势能 F 的一次变分为零,即 $\delta F=0$ 时,岩体的势能有驻值;其二次变分 $\delta^2 F > 0$ 时,为稳定状态; $\delta^2 F=0$ 时为随遇平衡; $\delta^2 F < 0$ 时为不稳定状态。

岩体稳定性评价 主要评价方法有刚体极限平衡法、数值法或解析法及可靠性分析法等3种。①刚体极限平衡法。即将岩体按刚性块体模型进行分析,用以计算滑动岩体的安全系数。②数值法或解析法。可分析岩体的弹塑性区域,并计算失稳的安全系数。由于近代电子计算机的出现,引入有限元等数值计算方法进行岩体稳定性分析,有助于得出更切合实际的结果。③可靠性分析方法。是近代兴起的有效的评定稳定性的方法,其优点在于用失稳概率或可靠度代替过去经常运用的经验安全系数。目前这一方法正在发展中。

提高岩体稳定性的措施 对岩体进行加固处理,以提高岩体的稳定性,是当前工程措施的重要研究领域。锚系技术、灌浆技术、地下围岩的锚喷技术等,都是有效的改善岩体稳定性的措施(见岩基处理)。与此相关的岩体工程监测技术,也是保证岩体工程稳定的重要环节,有助于预防或减轻岩体失稳带来的灾害(见岩体原位观测)。

(周维桓)

yanti yuanwei guance

岩体原位观测 (in-situ instrumentation of rock mass)

用量具或仪器量测岩体表面或内部在开挖、筑坝、水库蓄水等人为因素以及大气降水、地震等自然因素影响下性态变化及其过程的技术。通过量测,可以掌握岩石性态变化,检验岩石力学分析理论,为岩体工程的安全施工与运行提供科学依据,提高岩石工程设计、施工、管理水平,进一步发展岩石力学。观测工作包括确定观测项目、观测仪器选型、观测仪器埋设、测读及资料整理等内容。岩体原位观测在中国开始于20世纪50年代,70年代获得较大发展,现在大多数观测仪器都能自行制造,在数量上和质量上基本满足要求。当前观测设备正向两个方面发展:一方面发

展结构简单、便于维护检查、性能可靠的观测仪器;另一方面发展数据自动采集、传输、处理,能遥控遥测的观测系统。

观测项目及仪器 观测项目主要有位移、应变、应力、地下水压力等项,在地震区还有地震效应观测。原位观测是一项长期性的工作,要求仪器具有很高的可靠性与稳定性。各观测项目所用仪器设备类型众多,选型时应通过工程类比、理论假设及参阅设计资料,预估观测对象的变形、应力和地下水压力等参数的大小和变化范围,推定观测的时距和历时,并由此确定观测仪器应具备的精度、量程和最低的工作期限。

(1)位移观测。对于坝基与边坡,主要是观测垂直、水平位移及挠度,其中以对岩体稳定性影响较大的剪切位移最为重要。对于地下建筑物的位移观测见地下建筑物原型观测。由于变形观测成果比较直观可靠,资料易于分析,因而是原位观测中最普遍、最重要的项目。所用仪器设备有观测表面变形的经纬仪、水准仪、红外测距仪、收敛计、地面倾斜仪等;观测内部变形的多点位移计、钻孔测斜仪、挠度计等。

(2)应变观测。可测得岩体内各点的应变分布及其变化,并根据需要换算位移或应力。所用仪器设备有电阻应变片式、差动电阻式、钢弦式等应变计。单个应变计还可串联成锚杆应变计,或组装成平面应变及空间应变测量装置。

(3)应力观测。主要在岩体与建筑物接触面上进行量测,以了解两者之间的相互作用。对岩体内部应力,由于应力计和岩体之间的刚度匹配、埋设技术等还存在一些问题,尚难取得满意结果。所用仪器设备有电阻应变片式、差动电阻式、钢弦式及气压(或液压)平衡式等应力计。

(4)地下水压力观测。包括岩体中的渗透压力、作用在混凝土建筑物底面上的扬压力及地下洞室支护结构上的外水压力等。所用仪器设备除测压管与水管式地下水压力观测仪器外,其余的仪器的传感器与应力计相同,只是在测头传压膜之前用透水石代替应力计的压力囊。

观测仪器埋设 它是观测工作的一个重要环节,埋设质量的好坏,将直接影响到观测结果的正确性,以至观测工作的成败。仪器通常埋设在预先准备好的孔(坑)内,用与周围岩体性质相近的材料充填密实。孔(坑)及其周围的地质情况应作详细编录,并附以平面图和剖面图表示其位置。

观测 开始时首先建立初始值,然后按计划定期量测,一般初期测次较密,以后则根据测值变化速率与工程要求(如水库水位涨落、大气降水、汛期等)逐步调整。观测数据经过仔细审核以后,绘制成测值与时

间、工程活动（如开挖、浇筑、填筑、库水位变化等）或自然因素（如大气降水等）的关系曲线。观测资料应在尽可能短的时间内整理分析，发现问题，及时报告主管部门。

（吴铭江）

yantuti rudong

岩土体蠕动（creeping of rock mass and soil mass） 斜坡岩土体在坡体应力长期作用下发生的一种缓慢而持续的变形现象。蠕动开始时运动速率极为缓慢，往往不易觉察。蠕动常是急剧变形破坏的先兆，随着蠕动进一步发展，坡体不断松弛变形，直至发生突然的崩塌或滑坡。意大利瓦依昂（Vajont）水库于1963年发生近3亿 m^3 的巨型滑坡，在失事前三年已观测到有蠕动迹象，在滑坡即将发生前，其蠕动速率明显增大。

蠕动体类型 分为土体蠕动和岩体蠕动两类。土体蠕动多发生在粘性类土中，土体在干湿或冻融交替、或处于饱和等情况下，土体强度明显降低，在重力作用下很易产生蠕动。岩体蠕动主要是重力、地应力等各种力长期作用的结果。按蠕动变形特征，可分为倾倒型、扭曲型、松动型、塑流型等类型。① 倾倒型。多发生在陡倾角层状结构、由脆性岩石组成的斜坡。其变形特征是岸坡岩层向临空一侧折裂和倾倒，岩体呈现松动架空现象。② 扭曲型。主要发生在陡倾角、薄层的塑性岩层（如页岩、千枚岩、片岩等）或软硬互层的斜坡。其变形特征是岸坡岩层向临空侧歪斜，多呈现塑性弯曲，俗称“点头哈腰”，但很少折裂。③ 松动型。多发生在中厚层脆性岩石组成的反倾向斜坡，或由倾倒型进一步发展而成。其特点是岩层层序已错位扰动，松动架空现象严重。④ 塑流型。发生在坚硬岩层下伏有软弱岩层的斜坡，当软层产生塑性变形时，导致上覆岩层的蠕动，甚至解体和下沉挤入软层中。

防治 在选择建筑场地时，要避开蠕动体。对于建筑场地出现的蠕动迹象，需及时采取包括消除或减轻地表水和地下水的危害，改善边坡岩土体的力学强度或采用支挡建筑物、锚固等工程措施，以制止蠕动的进一步发展。

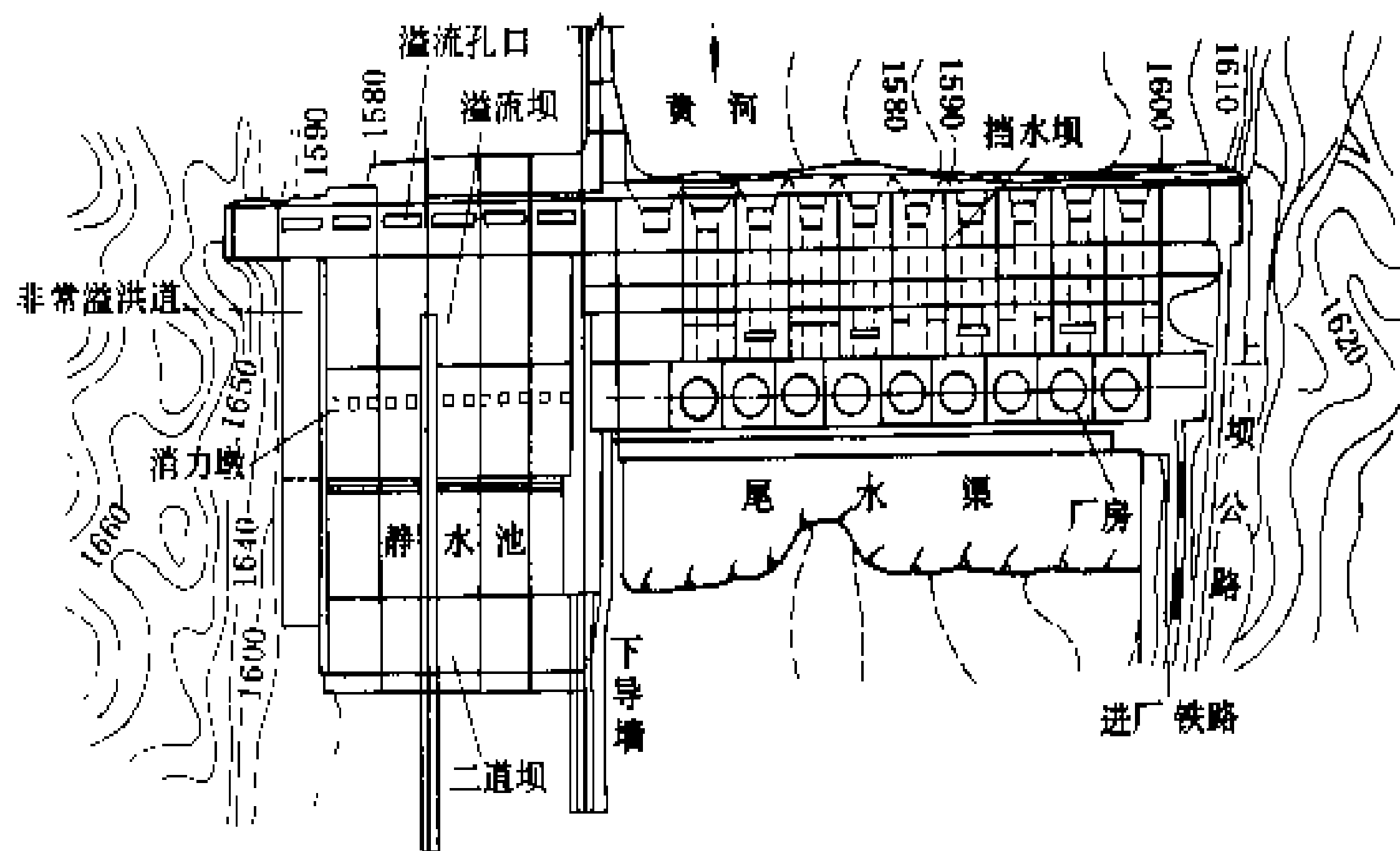
（邹小安）

Yanguoxia Shuidianzhan

盐锅峡水电站（Yanguoxia Hydropower Station） 位于黄河上游干流甘肃省永靖县境内，距兰州市约70 km。装机容量402 MW，保证出力178 MW，多年平均年发电量20.8亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。有8回110 kV输电线路，其中2回向青海省民和县送电，6回向盐锅峡附近地区送电。大坝为混凝土宽缝重力坝，最大坝高55 m。工程于1958年9月开工，1961年11月第一台机组发电，1975年11月8台机组投产，1990年第九台机组发电。

水文和水库特性 坝址以上流域面积182704 km^2 ，多年平均年径流量273亿 m^3 。水库设计总库容2.8亿 m^3 ，由于泥沙淤积，现仅余0.865亿 m^3 ，为日调节水库。大坝设计洪水标准为二百年一遇，相应洪水流量7020 m^3/s ，相应洪水位1620.8 m。校核洪水标准为千年一遇，相应洪水流量7500 m^3/s ，相应洪水位1620.8 m。水库正常蓄水位1619 m，死水位1618.5 m。调节库容现为0.06亿 m^3 。电站设计水头38 m，最大水头39.5 m，最小水头28 m。

枢纽布置 枢纽主要由大坝挡水坝段、溢流坝段、非常溢洪道和发电厂房等建筑物组成，见图。



盐锅峡水电站枢纽平面布置图

大坝坝基主要为白垩系红砂岩，砂砾岩次之，间有粉砂岩及粘土页岩。坝顶高程1624.2 m，坝顶长321 m。左侧为挡水坝段，坝后设厂房。右侧为溢流坝段，设开敞式溢洪道，溢流堰顶高程1609 m；设6个溢流口，尺寸为12 m \times 10.5 m；设平面钢闸门，用2台门式启闭机启闭。最大泄流能力5500 m^3/s 。采用底流消能方式。设两级消力池。第一级消力池长89.12 m，第二级消力池长35.2 m。在溢流坝右侧的非常溢洪道，由泄洪陡槽和挑流鼻坎挑流消能，最大泄流能力为1110 m^3/s 。

坝后式发电厂房，长 192.5 m，宽 18.4 m，高 40.03m。由 9 条压力钢管引水，钢管直径为 5.63 m，进口底坎高程 1600 m。厂房内安装 9 台混流式水轮发电机组，3 台单机容量为 44 MW，6 台为 45 MW。水轮机转轮直径均为 4.1 m。

变电站共装 5 台三相变压器，其中 4 台每台容量为 120MV·A，采用扩大单元接线，每 2 台机组接 1 台变压器。第 5 台变压器容量为 65 MV·A，接 9 号机组。变压器和 110 kV 屋外开关站布置在厂坝之间。

泥沙淤积和水轮机磨蚀 电站泥沙淤积和水轮机磨蚀问题比较突出。据 1975~1987 年资料统计分析，年入库平均含沙量为 0.967 kg/m³，汛期入库平均含沙量 2.01 kg/m³，年平均入库泥沙量 2180 万 t。由于库内泥沙淤积，水库总库容现仅有 0.865 亿 m³。据 1983、1985 年实测，通过水轮机泥沙量分别为 917 万 t/a 和 2218 万 t/a。过机泥沙粒径大于 0.05 mm 的沙量占总沙量的 40% 左右。使水轮机在汽蚀和磨损联合作用下严重磨蚀。

设计和施工单位 西北勘测设计院设计，水利电力部第四工程局施工。

(谷云青)

yanliu

堰流 (weir flow)

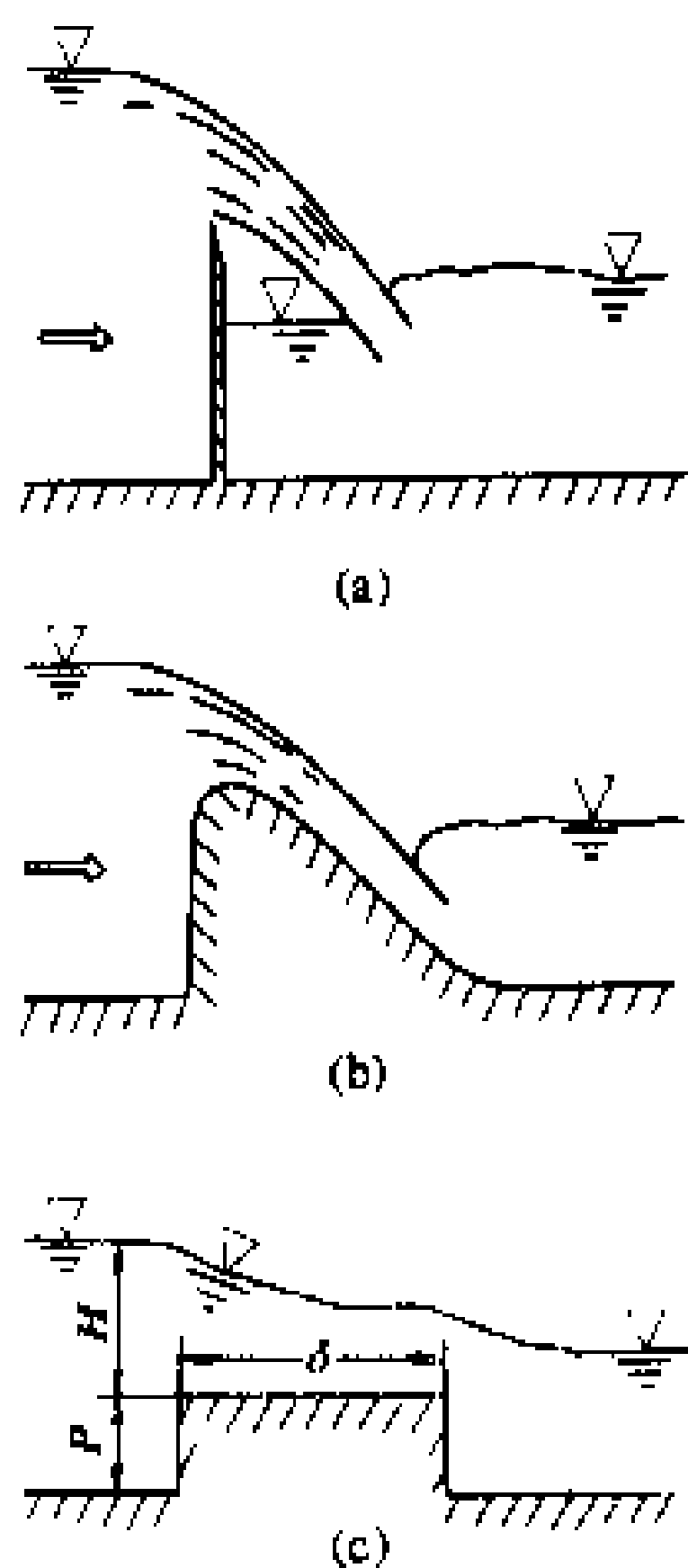
具有自由面的水流越过各种形式堤堰的溢流形态。堰流是自由面连续的明渠急变流，具有明显的水面降落，并伴有局部水头损失。

堰流按堰面形状和堰顶宽(δ)与堰上水头(H)之比 δ/H 分为薄壁堰、实用堰和宽顶堰三类，见图。δ/H>10 时视为明渠水流，不属于堰流。

(1) 薄壁堰流的代表形式为尖顶堰的自由跌流，常被用来作为测流设备，堰口形状有矩形、三角形、半圆形等。

(2) 实用堰是常用的溢流坝面形式，如奥奇(Ogee)曲线、WES 曲线(实用剖面堰)等。有时为增大泄流能力，让堰面出现轻微负压，即真空剖面堰。还有许多特殊形状的实

具有自由面的水流越过各种形式堤堰的溢流形态。



堰流分类

(a) 薄壁堰; (b) 实用堰; (c) 宽顶堰

用堰，如：拱坝溢流的瘦型堰，渠道引水的驼峰堰、侧堰等。

(3) 宽顶堰常见于低水头砌石坝溢流段、灌溉引水渠道进口、施工围堰的临时过水缺口等。河床式水电站的泄水闸或过水断面束窄的明渠河段，因侧收缩的影响，其水面线与宽顶堰水面降落相似，称“无坎宽顶堰流”。

堰流的过流能力为

$$Q=mB \sqrt{2gH_0^{3/2}}$$

式中 Q 为过堰流量; B 为堰顶宽度; $H_0=H+\frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}$ 为计入趋近流速水头的堰上工作水头; m 为流量系数，常见形式的流量系数值，如表所示。

各类堰流量系数表

堰流分类	条 件	常用形式	流量系数 m
薄壁堰	$\delta/H < 0.67$	Bazin 堰	$0.405 + 0.003/H$
实用堰	$0.67 < \delta/H < 2.5$	Ogee 坝面	0.492
		WES 坝面	0.502
宽顶堰	$2.5 < \delta/H < 10$	$P/H > 3$	0.385(理论值)
		进口边缘为棱角	0.32
		进口边缘为圆角	0.36

实际工程中的溢流堰常用闸墩分隔为若干个孔口，如 n 个宽度为 b 的孔口，这时需增计侧收缩系数 $\epsilon < 1$ ；有时堰流受下游水位顶托呈淹没状，而需计及淹没系数 $\sigma_s < 1$ 。则实际溢流堰的过流量用下式计算

$$Q=\epsilon\sigma_s mnb \sqrt{2gH_0^{3/2}}$$

(时启燧)

Yangzhuoyonghu Choushui Xu'neng Dianzhan

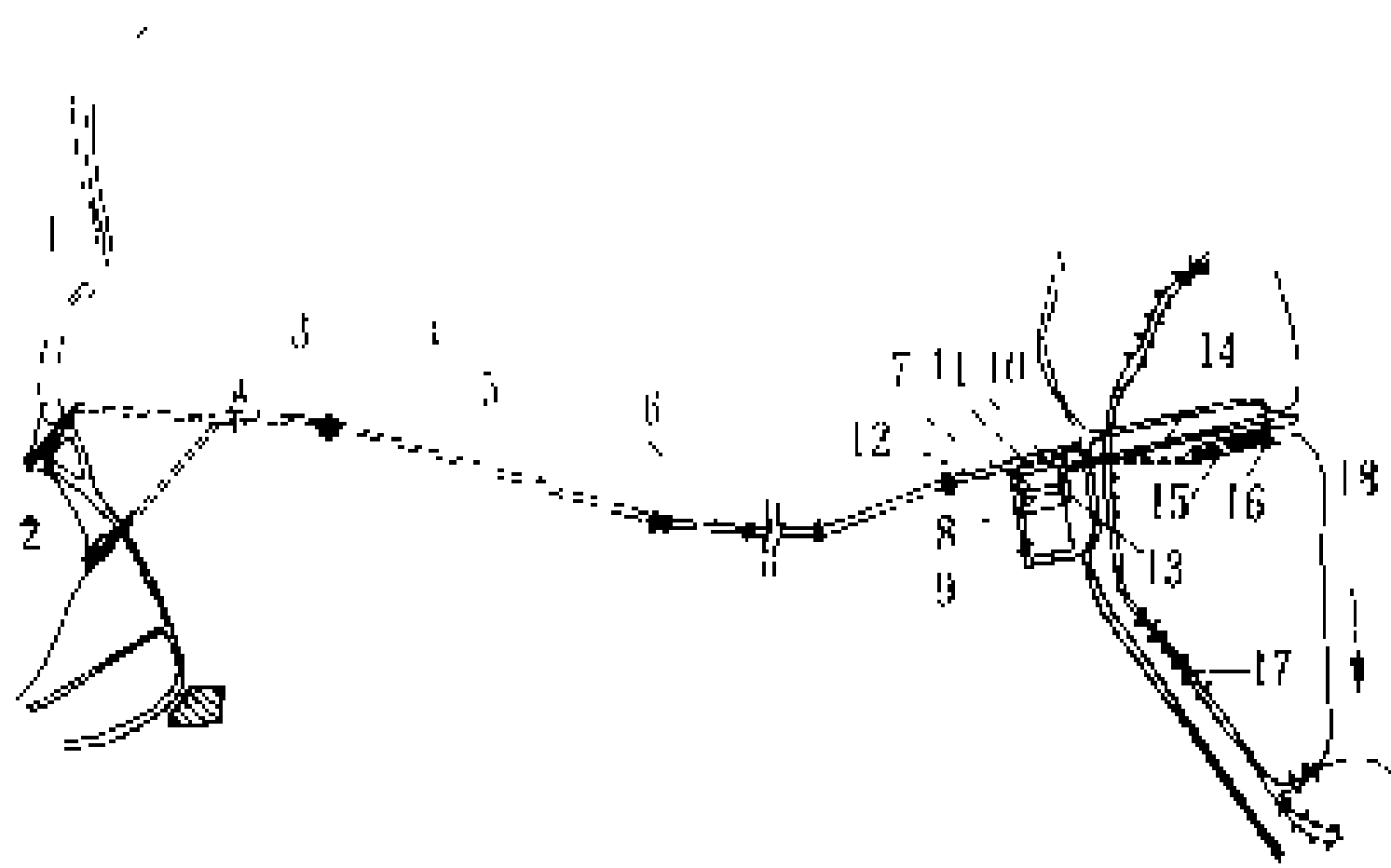
羊卓雍湖抽水蓄能电站 (Yamzho Yumco Pumped Storage Power Station)

位于西藏自治区首府拉萨西南约 86 km 处，设计装机容量 112.5 MW，安装 4 台单机容量为 22.5 MW 的三机式抽水蓄能机组，并预留 1 台 22.5 MW 的常规水轮发电机组的装机位置。电站年发电量 0.8 亿 kW·h，年抽水用电量 1.24 亿 kW·h。抽水蓄能机组年利用小时 1232 h。电站以 5 回 110 kV 输电线路连接拉萨、择当、日喀则等地区，担负系统调峰、调频任务。电站于 1989 年列入国家基建计划预备开工项目，1990 年列入国家基建年度计划开工项目，1991 年 5 月 25 日主体工程开工。枢纽总布置见图。

上水库和下水库 利用羊卓雍湖(以下简称羊湖)



为上水库。羊湖系天然高原封闭湖泊，集水面积 6100 km²，水面面积 620 km²，水深一般 30 m，最深处达 60 m，容积 150 亿 m³。羊湖水量来源于流域降水和冰川，多年平均年入湖径流量 9.54 亿 m³。水量消耗于蒸发。二者趋于平衡。羊湖水位变动于 4442.58~4437.00 m 之间，年际变幅 4.28 m，年内变幅 1.23 m。只要基本不动用羊湖的水量，把羊湖的容积用于蓄能，则不但可以对系统日负荷削峰填谷，而且还能利用系统夏季多余的电能抽水，在冬季系统缺电时发电。



羊卓雍湖抽水蓄能电站枢纽平面布置图

1—羊卓雍湖；2—上水库进（出）水口；3—引水隧洞；4—调压井；5—压力管道埋管段；6—压力管道明管段；7—厂房；8—主变压器场地；9—开关站；10—安装间；11—球阀室；12—第一副厂房；13—第二副厂房；14—尾水渠；15—沉沙池；16—低扬程泵房；17—灌溉渠道；18—雅鲁藏布江

利用雅鲁藏布江起下水库作用。雅鲁藏布江水量充沛，最枯流量为 430 m³/s。在电站厂址区，江面较宽，江水位变幅较小。常年洪水达 3500 m³/s，与最枯流量时相较，江水位变幅仅 3.7 m。

羊湖最低水位 4437.0 m 的保证率为 99.8%，确定为电站发电控制水位。电站厂区设计洪水标准为三十年一遇，雅鲁藏布江相应洪水流量为 5360 m³/s，电站尾水位为 3596.59 m。电站非常运用洪水标准为二百年一遇，雅鲁藏布江相应洪水流量为 6790 m³/s，尾水位为 3596.77 m。

引水系统 由进水口、引水隧洞、调压井、压力钢管道、尾水渠、沉沙池等建筑物组成。

进水口为压力墙式，发电控制水位 4437.0 m，底板高程 4423.0 m，设有拦污栅和事故闸门。闸门尺寸为 2.5m×2.5 m，最大引用流量 16 m³/s。

引水隧洞总长 5883.369 m，纵坡 0.0081，圆形断面，内径 2.5 m，承受的内水压力为 0.21~0.72 MPa。隧洞穿越砂板岩互层，地质条件复杂，用 30 cm 厚的钢筋混凝土衬砌。发电引水流量 13.2 m³/s。

调压井下部为竖井，直径 2.5 m，高 59.1 m。上部设差动式上室，内径 19 m，高 7 m。

压力钢管道全长 3108.558 m，最大内水压力为 9.76 MPa，最小内水压力为 5.38 MPa。前段为埋藏式，长 749.115 m，钢板最大厚度 20 mm。后段为明管，长 2359.443 m，钢板最大厚度 54 mm。内径 2.4~2.0 m。

发电厂房 岸边式厂房，位于雅鲁藏布江南岸一级阶地上，距江边约 480 m。主厂房长 69.8 m，宽 14.9 m，高 38 m，基础为泥质板岩和中厚层细砂岩。安装间位于主厂房左侧，长 17m。第一副厂房紧靠主厂房东侧，内装发电机电压断路器等一次电气设备。第二副厂房紧靠安装间，内设中央控制室及二次设备房间。110 kV 开关站位于厂房东侧。尾水渠总长 475.4 m，宽 3.5 m，高 2.6 m。

沉沙池 雅鲁藏布江水汛期含沙量较大，为减轻机组过流部件和钢管的磨损，在江边修建沉沙池。沉沙池总长 154.8 m，净宽 25 m，高 6.6 m，平均流速 0.09 m/s，可满足沉降粒径≥0.1 mm 的保证率大于 80% 的要求。江边建低扬程泵房，内装 5 台泵，4 台工作，1 台备用。泵的最大抽水扬程 13.5 m，每台抽水流量 2 m³/s。电站抽水时，江水先用低扬程泵抽入沉沙池，经沉沙处理后，进入主机蓄能泵的进水钢管。

机电设备 抽水蓄能机组为三机式。水轮机为竖轴水斗式，转轮节圆直径 1.58 m，额定转速 750 r/min，额定出力 23.1 MW，额定水头 816.1 m，额定流量 3.168 m³/s，最高效率 91.38%。蓄能泵为竖轴单吸多级离心泵，泵轮直径 1.312 m，额定转速 750 r/min，额定流量 2 m³/s，额定功率 19 MW，额定扬程 847 m，最高效率 87.3%。每台蓄能泵前装设 1 只直径为 1000 mm 的进水蝶阀。发电电动机为竖轴悬式空冷。三相主变压器额定容量为 31.5 MV·A，与发电电动机组成单元接线。电站监控采用计算机辅助监控系统（CACS）。

主要工程量 土石方明挖约 54 万 m³，石方洞挖约 8.6 万 m³，混凝土浇筑约 11.6 万 m³，钢筋钢材 1.18 万 t，金属结构安装 3580 t。

设计和施工单位 成都勘测设计院设计，武警水电工程指挥部施工。

（周桂珠）

yaogan

遥感 (remote sensing) 根据电磁波理论以遥感仪器(传感器)从远距离量测和记录目的物特征的探测方法。遥感取得的资料一般有两种：一是磁盘记录的曲线和数据；另一是摄影和扫描等所得的影像。以其资料取得的方式划分有：①主动遥感。人工向探测物发射电磁波，然后接收反射回来的信息，如探测雷达取



得的资料。②被动遥感。接收被探测物体自身的发射和反射来的信息,如各种摄影机和扫描仪取得的影像。以传感器的运载工具划分有航天遥感、航空遥感和地面遥感。目前航天和航空遥感资料广泛应用在地质勘察和农业、林业、军事和科研等各个方面。通过对各种遥感影像的解译,能获得调查区的地形、地貌、地质构造、物理地质现象及水文地质等多方面资料。

航天遥感 航天飞机、地球卫星及宇宙飞船等作为传感器的运载工具,以主动或被动方式取得遥感资料。卫星相片是航天遥感的主要资料,其特点是覆盖面积大、地质信息量多、分辨能力高、成像时间短。可有效地用于研究区域地质构造,划分构造单元或构造体系,编制小比例尺地质图。也可用来监测某些地质环境的变化。另外,卫星上装载的反束光导管摄像仪(REV)及多光谱扫描仪(MSS)可分别得到三个波段和四个波段不同分辨效果的影像,能识别航片上难以区分的地质体。如MSS₄对水体有一定的穿透能力,影像上可看出水下地形甚至地质构造;MSS₅影像能清楚反映地层岩性,植物呈暗色;MSS₆影像对水体显示清楚,地下水埋藏较浅时色调较暗,结合地貌及植物可圈定浅埋地下水的分布范围;MSS₇影像上植被及地表水显示清楚,含水地层色调深,透水层色调浅,地层岩性及褶皱断裂也显示清楚。因此,使用时可根据各波段影像特点进行选择。卫星影像虽有很多优点,但比例尺太小,目前尚难于编制较大比例尺地质图。

航空遥感 飞机、直升机及飞艇等作为传感器运载工具,以主动或被动的方式取得遥感资料。如普通航空相片、航空红外及侧视雷达成像等。航空相片的比例尺一般较大,中国早已完成全国范围1:5万的航空摄影,大部分地区有1:35000、1:25000的航片,局部地区还有1:10000或更大比例尺的航片。已较广泛用来研究工程区的河谷形态、阶地分布、冲沟发育程度;滑坡、崩塌体、喀斯特洞穴和洼地的分布、冲洪积扇的特征;出露面积较大的侵入体、火山岩;性质差异明显的沉积岩及变质岩的分布;判译褶皱的轴向、形态和类型;断裂构造的分布、走向、规模及相互切割关系;地下水出露点的分布,结合地貌还可分析地下水的补排关系等。

地面遥感 车、船及塔台等为传感器的运载工具或安置点,以主动或被动的方式取得遥感资料。如普通陆地摄影、彩色红外摄影及多波段陆地摄影等。其特点是影像比例尺大、清晰、分辨能力高、立体感强,不同波段影像可突出反映不同地质体的特征。中国水电工程勘察部门多利用陆摄相片研究难以攀登的高陡岸坡和峭壁上的断裂分布、地质体结构,作为编绘建筑区工

程地质图的基础资料。

遥感相片的工程地质解译方法 通常分为三种:常规目视法、光学增强法和电子计算机自动成图法。

目视法是解译的基本方法,其工作程序为:①搜集测区遥感、地质和地形等资料,图像处理、复制镶嵌图,建立解译标志。②室内解译。专业人员借助简单的仪器,根据建立的标志初步解译成草图。③野外典型地段实地校核初步解译的成果,搜集有关地质资料,分析误解或遗漏地质现象的原因,研究测区各种地质体的成像特征。④按现场核对结果修改和补充初步成果,绘制正式地质解译图表、编写地质说明。

光学增强法是通过光学原理将不清晰的影像使其增强或突出其一部分影像,以提高解译效果。如常用的假彩色合成、彩色透明片及彩色等密度分割等都是解决这一问题的不同方法。

计算机自动成像法主要是将影像转换成数字化磁带,再根据光谱特性由计算机自动识别地质体和成图。

中国水利水电工程地质勘察中,早已使用航片绘制地形图,编制小比例尺地质图。近年来除广泛应用卫片和普通航片外,并试用航空红外摄影、多波段扫描及侧视雷达等技术研究水库、工程区的某些专门地质问题及抽水蓄能电站的规划选点,都取得较好的效果。目前在研究如何应用遥感方法编制建筑物区较大比例尺工程地质图。

参考书目

长春地质学院. 专门水文地质学. 北京:地质出版社,1980

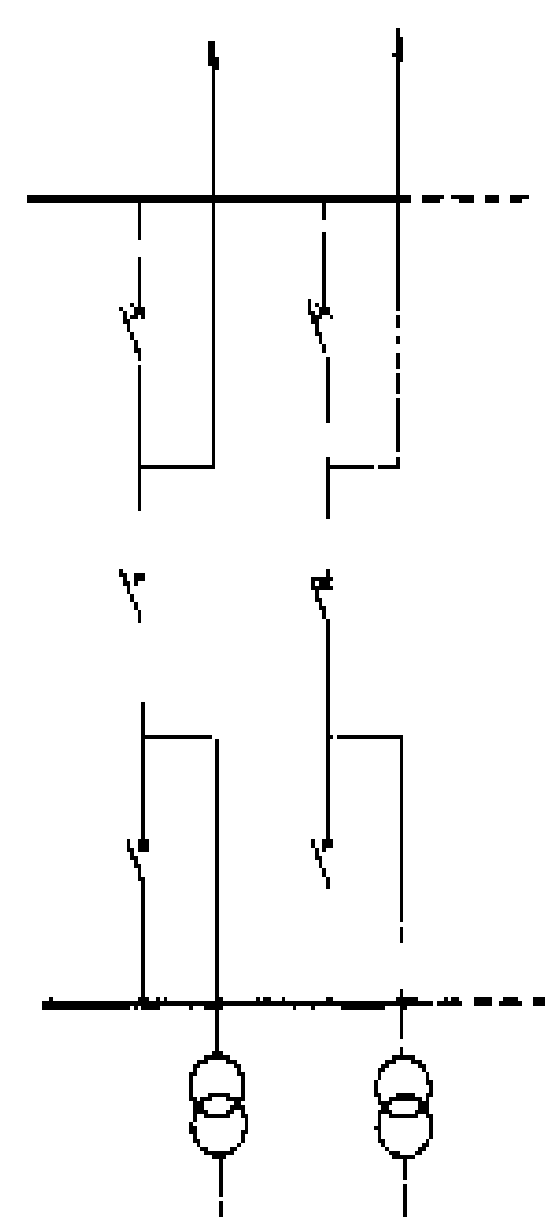
(崔诗礼)

yi ge ban duanluqi jiejian

一个半断路器接线 (one and a half breakers scheme)

两条回路有3台断路器的双母线电路,也称一倍半接线。这是介于单断路器双母线接线

和双断路器双母线接线之间的一种接线,如图所示。



一个半断路器接线图

一个半断路器接线是现代国内外大型水电站330kV及以上的超高压配电装置中应用较多的一种接线。其优点为:①比双母线带旁路母线接线简单清晰。②供电可靠性高。任一条母线所连接的设备故障或检修,以及任一台断路器检修都不影响任何回路的正常供电;每一回路和母线相连接的断路

Yi 伊

器故障,只影响本回路短时停电;两回路间的联络断路器故障也只影响这两条回路短时停电,停电造成的影响较小。③一条母线检修时只能单母线运行,此时线路故障,断路器又拒动;或者此时母线故障;抑或正常双母线运行时两条母线同时故障都不会造成全电站停电。④操作检修方便。隔离开关仅作检修时用,避免了隔离开关的大量倒闸操作,减少了误操作可能性,且有利于实现操作自动化和远动化。⑤正常工作时两条母线和所有断路器都投入运行,从而形成多环形供电,运行调度灵活。缺点是:①与双母线带旁路母线相比,为满足继电保护、测量、同步等要求,需相应增加电流、电压互感器的数量和投资,断路器数量也较多。②继电保护和二次接线比较复杂,增加二次设备的维修工作量。③任一回路故障,需同时断开两台断路器,断路器需满足并联开断的要求。④对担任调峰任务的水电站,由于经常开停机,需频繁切合两台断路器,增加断路器故障几率和检修的工作量。停机使相应回路的出线按单母线运行,影响该回路供电可靠性。

一个半断路器接线一般适用于对供电可靠性要求较高、出线电压在 330 kV 及以上的大型水电站。当进出线回路数相等或相差很少的情况下较为适宜。另外,同一串内两回路最好分别为进线和出线。若两回均为出线时,当两回路间的联络断路器故障;或一串内和一条母线连接的断路器检修而接至另一条母线的回路又发生故障时,这两种情况都将使该串中两个出线回路同时停电,故此时要尽量避免两个出线均送往同一地

点。同此理由,也要避免两个进线接在同一串内,以免两个电源回路同时停电,造成系统大量缺电。

(潘天缘)

Yili He shuixi shuinneng ziyuan

伊犁河水系水能资源 (hydropower resources of Ili river system) 据 1980 年《中华人民共和国水力资源普查成果》统计,伊犁河水系在中国境内部分的理论蕴藏量为 617.9 亿 kW·h/a,其中可能开发资源(见水能资源)为 150.91 亿 kW·h/a。可能开发资源大都集中在干流上,其分布见表。

伊犁河有 3 条源流:特克斯河、巩乃斯河和伊犁喀什河。一般认为特克斯河为干流,它发源于南天山山脉,先自西向东流,当巩乃斯河汇入后,转而自东向西流,喀什河汇入后始称伊犁河,经伊宁市出中国境进入苏联。巩乃斯河和喀什河都发源于天山北麓,自东向西流,相互平行。干流(包括特克斯河)拥有理论蕴藏量 210.5 亿 kW·h/a,约占全水系的 1/3。可能开发水电站 19 座,装机容量 1710MW,其年发电量为 100.05 亿 kW·h,占全水系的 2/3。其中最大规模为卡甫其克水电站,装机容量 271 MW,其地形条件优越,对外交通方便,水库库容大而淹没损失少,但地质条件较复杂。伊犁喀什河为最大支流,水能资源也较丰富,拥有理论蕴藏量 151.4 亿 kW·h/a,可能开发水电站 9 座,装机容量 615 MW,年发电量为 28.54 亿 kW·h。其中托海水电站已建成,装机容量 50 MW。

伊犁河水系水能资源统计表

河 流 名 称	流域面积 (km²)	多年平均 流 量 (m³/s)	河道长度 (km)	水面落差 (m)	理论蕴藏量 (亿 kW·h/a)	可能开发资源		
						电站 座数	装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kW·h)
水 系 合 计					617.9	38	2738	150.91
其中:干流	62266	470.8	410	1177	210.5	19	1710	100.05
支流:科克苏河流域	6600	70.6	188	218.5	82.3	7	305	18.89
巩乃斯河流域	7316	60.0	215	1509	44.7	1	10	0.53
伊犁喀什河流域	10480	133.2	302.9	2506	151.4	9	615	28.54
其他支流					129.0	2	98	2.9

(曹学敏)

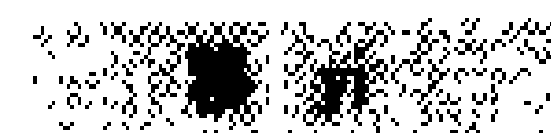
Yitai Pu Shuidianzhan

伊泰普水电站 (Itaipu Hydropower Station)

位于南美洲巴拉那河中游巴西与巴拉圭两国的边界河段上,装机容量 12600 MW,年发电量 710 亿 kW·h,保证出力 7070 MW,是当今世界上建设规模最大的水电站。主坝为双支墩坝,最大坝高 196 m。该工程由巴西和巴拉圭两国共建,所发电力由两国分享。

工程于 1974 年开始准备,1975 年 10 月开工,1978 年 10 月截流,1984 年开始发电,1992 年装完 18 台机组,总工期 18 年。(参见彩图插页第 15 页 25 图)

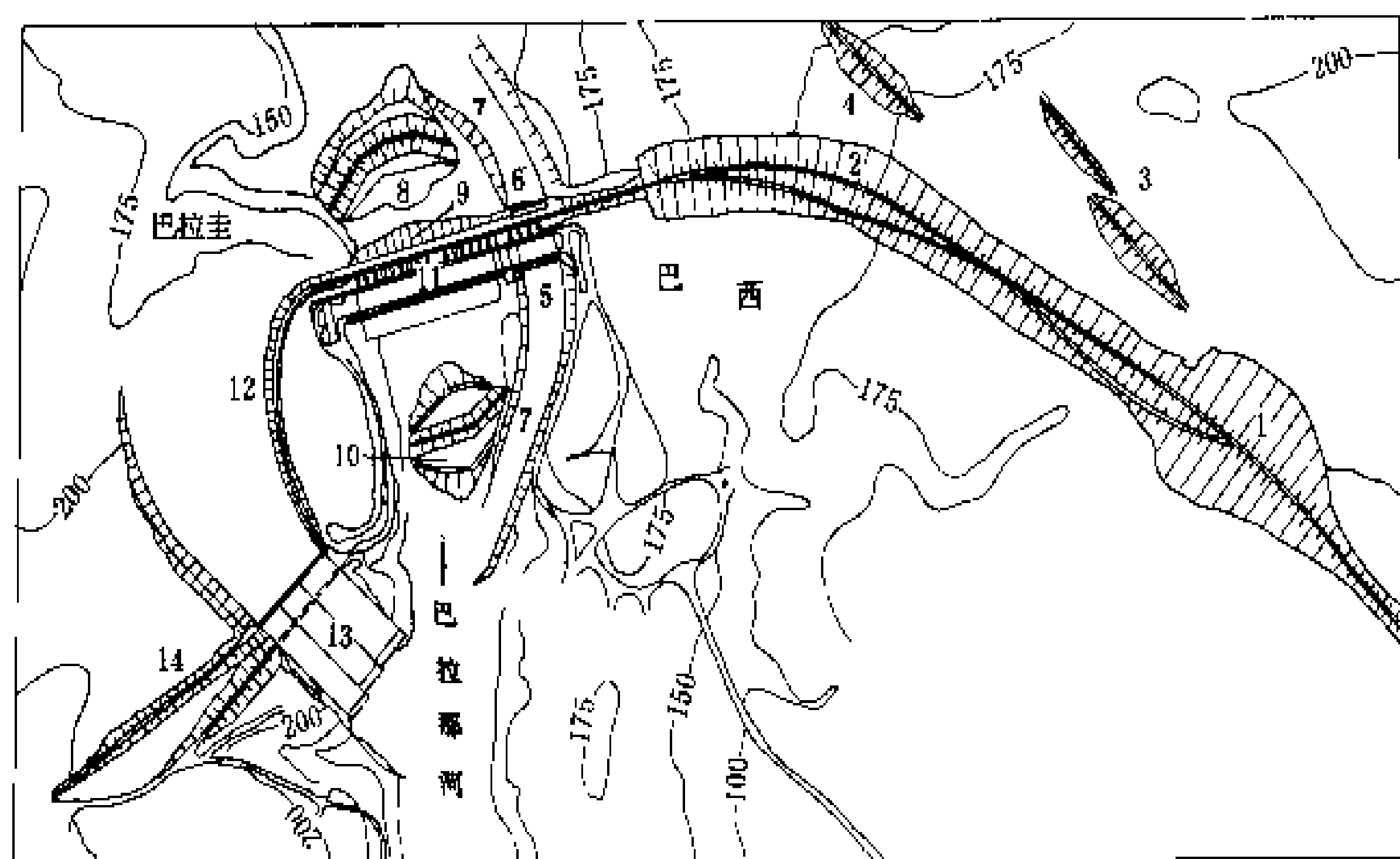
水文和水库特性 坝址以上流域面积 82 万 km²,多年平均年径流量 2860 亿 m³,平均年输沙量 4500 万 t。水库正常蓄水位 220 m,相应库容 290 亿 m³,死水位 197 m,调节库容 190 亿 m³。连同其上游已建的干



支流水库, 共计调节库容 1265 亿 m^3 , 库容调节系数 β_2 为 0.44, 调节性能良好。

枢纽布置 坝址区基岩主要为厚层玄武岩, 夹有多孔杏仁状玄武岩和角砾岩互层, 没有大的断层发育, 地质条件较好。主坝为双支墩坝, 长 800 m, 坝顶高程 225 m。左侧重力式导流控制坝段长 170 m, 接左翼单支墩大头坝 264 m, 再接堆石坝 1984 m 和土坝 2294 m 与左坝肩相连。右翼弧形单支墩大头坝, 长 986 m, 接岸边溢洪道 390 m, 再接土坝 872 m 与右坝肩相连。见图。挡水前沿总长 7760 m, 留有扩大装机和备建船闸的位置。

溢洪道最大泄洪能力 62200 m^3/s , 设 14 孔溢洪孔, 孔宽 20 m, 高 21.3 m, 用弧形闸门控制。泄槽用两道隔墙分为 3 个区, 槽长 483 m, 出口采用挑流鼻坎消能。主坝和导流坝段共设 18 个进水口, 18 条压力钢管, 直径为 10.5 m, 采用背管布置, 外包钢筋混凝土。厂房长 968 m, 宽 99 m, 高 112 m, 内装 18 台水轮发电机组, 单机容量 700 MW。设有两个安装间和两个控制室。



伊泰普水电站平面布置图

- 1 左岸土坝; 2—堆石坝; 3, 4—堤; 5—导流明渠; 6—导流控制坝段; 7—混凝土拱形围堰; 8 上游围堰; 9—双支墩主坝; 10—下游围堰; 11—发电厂房; 12 单支墩大头翼坝; 13 岸边溢洪道; 14—右岸土坝

机电设备 混流式水轮机额定水头 118.4 m, 转轮直径 8.65 m, 额定流量 645 m^3/s , 最高保证效率 94%~95%。两国电力频率不同, 属巴西的 9 台发电机为 60 Hz, 属巴拉圭的 9 台为 50 Hz。转速分别为 92.3 r/min 和 90.9 r/min。

巴西所属机组的电力, 升压后用 3 回 765 kV 输电线路, 经 889 km 送电给巴西的圣保罗市附近变电所。巴拉圭所属机组的电力升压至 500 kV 后, 一部分由 500 kV/230 kV 自耦变压器引出的 1 回 230 kV 输电线路送电给巴拉圭首都亚松森; 其余用 2 回 ±600 kV

直流输电线路, 分别经 785 km 和 806 km, 送至圣保罗市, 出售给巴西。

工程量和造价 土石方工程量为 9245 万 m^3 , 混凝土工程量 1180 万 m^3 。1974 年提出的可行性报告所列直接工程费用为 23.5 亿美元, 连同施工期利息等共计 31 亿美元。随着通货膨胀和施工期利息的增加, 使投资数不断增长, 至 1991 年竣工时, 总投资达 234 亿美元, 单位投资 1875 美元/kW。

(陆钦侃)

yimin anzhi

移民安置 (resettlement of inhabitants)

按照建设单位与有关各方制订的实施阶段移民安置规划设计, 有计划、有组织地将库区居民迁至库外适宜的安置点, 定居落户, 在新的环境里重建生产基地和生活设施的措施。水库移民属于非自愿移民, 应受到社会的尊重和支援, 移民的一切权益受到国家的保障。世界各国和世界银行等国际贷款组织对非自愿移民的安

置工作十分重视, 旨在移民得到妥善安置, 保持其搬迁前的生活水平。各国根据本国的情况, 因地制宜, 以开发性移民安置, 使移民安居乐业, 长治久安。

中国现阶段的移民方针: 根据 1991 年 2 月中华人民共和国国务院令第 74 号发布的《大中型水利水电工程建设征地补偿和移民安置条例》中指出: “国家提倡和支持开发性移民, 采取前期补偿、补助与后期生产扶持的办法。”

并指出“水利水电工程建设征地补偿和移民安置应当实行下列原则: ①正确

处理国家、集体、个人之间的关系, 移民和移民安置区应当服从国家整体利益安排。②移民安置与库区建设、资源开发、水土保持、经济发展相结合, 逐步使移民生活达到或者超过原有水平。③移民安置应当因地制宜、全面规划、合理利用库区资源、就地后靠安置; 没有后靠安置条件的, 可以采取开发荒地滩涂、调剂土地、外迁等形式安置, 但应当遵守国家法律, 法规的有关规定。”

移民安置方式 根据自然、经济、政治、社会条件, 中国对于城镇和农村的移民, 其安置方式是不同的。在

已建水库的库区,基本上均属农业经济区,故以农村移民为主,一般约占水库移民的80%左右,农村移民一般都在农村安置,其安置方式可归纳为①按安置的组织形式划分:有成建制的迁移建立新居民点(以原有行政村或组);与相邻村组合并、分散插组(分插在安置区村组内);投亲靠友(个别迁至亲友居住地及职工家属农业户口转为非农业户口迁至对方所在地或所在单位)。②按迁移的范围划分:有在本组、本村就地后靠,迁至本县外乡,以及远迁外县、外省。③按从业门路划分,农业与大农业(农、林、牧、副、渔);乡村企业与第三产业;也有少量的工矿企业吸收及农业户口转为非农业户口,就业于二、三产业。

对于城市和集镇以及工矿区的居民,一般随原城镇、工矿区迁移或后靠,仍保持其原有的职业。城镇若无重建的必要,居民可转移到其他城镇安置。

移民安置生产措施 恢复和发展生产是移民赖以生存的基本条件,根据中国的国情,农村移民以大农业安置为主,以土地承载力为基础,发展种养业,开发当地资源,实行多种经营,大力发展商品经济。目前所采取的途径有:①在安置区合理调整现有耕地,兴修水利灌溉工程发展灌溉面积,改土造田,改坡地为梯地,改良土壤,提高肥力,适当调整种植结构,增加单位面积产量和产值。②调拨国有农场、林场、牧场的土地。③开垦宜农、宜林的荒地、荒山、滩涂。④开发利用安置区的水域。⑤有计划地利用开发本水库区和安置区的水土资源。⑥开发矿产资源、风景资源。⑦兴办乡村企业和第三产业,或迁至城市,或工矿区工业招工等。⑧发展农户庭园经济。

移民安置规划 规划的目标是要达到妥善安置、发展生产、繁荣经济。对农村移民规划,须调查搜集安置区有关的自然地理、经济地理、土地及其他资源,地方有关的史料、流行病学、环境卫生学及工农业、交通、商业生产情况和近期国民经济发展计划等资料;进行移民安置环境容量的调研与分析,选择安置区范围;生产措施项目的规划设计;安置方案优化比选;居民点规划,要考虑适宜的地形、地质、水源条件,居民点总体布置要合理,并配置必要的道路、供水、供电、挡护及排水,以及统筹规划文教、医疗、商业、服务业网点和对外交通。

对城镇迁建规划,要根据建库后区域经济的变化情况,确定是否迁移、合并、撤销或防护。新址规划要保持它的原有性质,一般库区受淹的城镇都是县城一类的小城市,它是联系城市和农村的纽带,其特点是有相当比重的农业人口,工业基础薄弱,产值低,以农副产品加工和地方支农的五小工业为主,医疗、卫生、文教及商业服务行业等主要面向农村,是全县政治、经

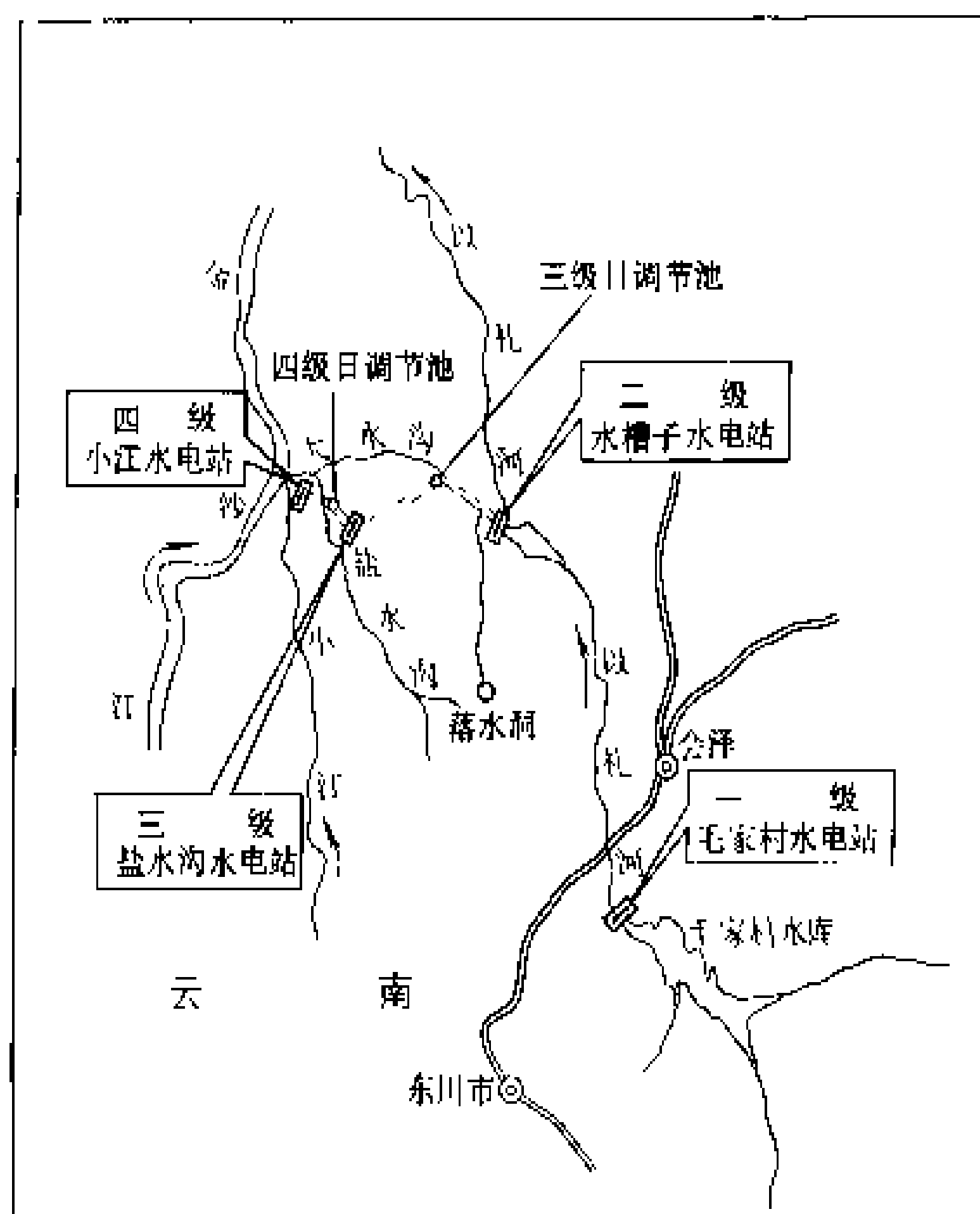
济、文化的中心。还有乡镇,其规模更小,但也是一定地域内的政治、经济、文化的中心,故新址的地理位置要恰当,同时须选择适宜的地形、地质、水源条件,并按原有规模(设计水平年的人口与用地)进行总体布局规划,对居住建筑、公共建筑标准及道路、给水、电力、电信、排水、防护等市政工程标准,以淹没实物为基础,并根据实际情况,因地制宜,合理确定。

(张根林)

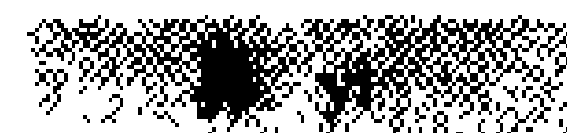
Yilihe Tiji Shuidianzhan

以礼河梯级水电站 (Yilihe Cascade Hydropower Stations) 位于中国云南省北部,由毛家村、水槽子、盐水沟和小江4座水电站组成。

以礼河系金沙江支流,全长122 km,自南向北,经会泽县和巧家县注入金沙江,流域面积2558 km²。上、下游河段坡降较大,中游较平缓,自然落差约2000 m,4座水电站共利用水头1413.2 m,利用率为70.7%。下游河段与金沙江流向近乎平行,二级水槽子水电站坝址距金沙江最近,距离约12 km,但水面高差达1380 m。二级、三级、四级电站,实行跨流域引水开发。开发以发电为主,兼有防洪、灌溉效益。4座水电站总装机容量321.5 MW,设计多年平均年发电量16亿kW·h,投入运行后修正为12.65亿kW·h。1956年7月二级水槽子水电站开工,1958年8月第一台机组发电。此后,其他3座水电站相继开工建设,最后发电的是四级小江水电站的4号机组,于1972年10月投产。4座水电站总投资3.8337亿元,平均每千瓦投资1192.4元。以礼河梯级水电站位置如图所示。



以礼河梯级水电站位置示意图



以礼河梯级水电站建成时是云南省电力系统的主力,担负调峰、调频和事故备用任务。至1990年底,累计发电量254.3亿kW·h,平均发电成本为0.013元/(kW·h)。按电力系统发电企业1990年不变价格计算,累计产值20.03亿元。

一级毛家村水电站水库建成后,引以礼河水的灌溉面积设计为13.45万亩,实际已达27万亩,其中旱涝保收农田7.4万亩;使12800亩农田免遭洪涝灾害;毛家村至新街角落可以通航;林业、渔业、及种植、养殖业都有较大发展。

以礼河梯级水电站由昆明勘测设计院设计,水利电力部第十四工程局施工。

一级毛家村水电站 位于会泽县城南9.5 km处。坝址以上流域面积868 km²。拦河坝为粘土心墙土坝,最大坝高82.5 m。水库总库容5.53亿m³,具有多年调节能力。泄洪洞为无压洞,长590 m,最大泄流量1320 m³/s。右岸压力引水隧洞,长504 m,设有直径8 m,高65 m的调压井。电站的地下式厂房,装有2台单机容量为8MW的斜流式水轮发电机组,额定水头58 m,最大水头77 m,最小水头27.5 m。1958年开工,1971年建成投产。

二级水槽子水电站 位于会泽县城北约10 km水槽子峡谷处。坝址以上流域面积1233 km²。水库总库容958万m³,具有周调节能力。坝型为重力坝,最大坝高37 m。2条引水隧洞设于左岸,洞径2.3 m,各长98.85 m。地下厂房内装有2台单机容量8.75 MW的混流式水轮发电机组,额定水头77.5 m,最大水头79 m,最小水头71.8 m。本级是跨流域开发的首部工程,引水供下游三、四级水电站发电。1956年7月开工,1958年8月第一台机组发电,1960年3月竣工。

三、四级水电站 三级盐水沟水电站、四级小江水电站,两座水电站均为引水式开发,布置方式和工程规模基本相似。坝型分别为匀质土坝和钢筋混凝土轻型坝;设计水头均为589 m;最大水头分别为629 m和628.2 m;最小水头分别为583 m和602 m;装机容量均为144 MW,各装有4台冲击式横轴水轮发电机组(参见彩图插页第30页57图),水轮机有20个水斗,转轮节圆直径1700 mm;各有一条引水隧洞,长度分别为2240 m和2350 m;各自的引水隧洞末端均设调压井,后接压力管道,在厂房前分为4条支管引水到机组。盐水沟水电站1957年7月开工,中间停工2年,1966年12月第一台机组发电,1971年7月竣工。小江水电站于1958年9月开工,中间停工8年,1970年10月第一台机组发电,1977年11月竣工。

(杨德晔)

yizhongliu

异重流 (density current) 比重不同可以相混的两种流体因比重差异而发生的相对运动。当进入水库的挟沙浑水与库内清水相遇时,在适宜的条件下,浑水会潜入清水,沿库底向坝前运动形成水库异重流。水库浑水异重流是挟沙水流一种特殊的运动形式,和一般明渠水流不同,不是水流挟带泥沙,而是泥沙的存在造成有效重力,驱使挟沙水流运动。大气中云雾的运行,火电厂冷却池中冷热水的相互运动,以及河流入海口海水沿河底上溯形成的盐水楔等也是自然界常见的异重流现象。

1935年美国科罗拉多河胡佛坝(Hoover Dam)泄水孔排出浑水,当时坝上库内却是清水,引起了水利界对异重流的重视和研究。中国在20世纪50年代中期开始在官厅水库系统地进行异重流的观测和研究。

水库异重流的产生条件可用下式判断

$$\frac{u_0^2}{(\Delta\rho/\rho')gh_0} \leq 0.6$$

式中 u_0 及 h_0 分别为异重流潜入点处的流速和水深; $\Delta\rho$ 为清浑水的密度差; ρ' 为浑水密度; g 为重力加速度。由上式可见,水库入库段如 u_0 过大或 $\Delta\rho/\rho'$ 过小都不能产生异重流。悬移质中要有一定数量的细泥沙也是形成异重流的必要条件。异重流产生后能否运行到坝前需具备条件为:①进库流量需达到一定数值,并有一定的持续时间;②水库纵向有一定的比降。水库平面上的扩大、缩小及弯道等局部损失,不利于异重流向坝前运动。

利用异重流排沙是减少水库淤积的有效方法,特别是在干旱地区,为了节约水量,利用异重流排沙更有重要意义。水库异重流排沙率(一次洪水排出水库的沙量与入库沙量之比)取决于到达坝前异重流的含沙量及坝前排沙孔的适时开启,以及排沙孔口的尺寸、高程等。异重流的挟沙能力与其流速有关,流速大所能挟带的泥沙颗粒粗,含沙量也大。当含沙量较高的浑水进入水库后,会形成高浓度异重流。由于含沙量高,泥沙沉降极其缓慢。又因清浑水的密度差小,界面掺混作用减弱,异重流排沙能持续较长的时间,故在含沙量高的河流上的水库,异重流排沙率亦较高。如美国米德湖水库(Lake Mead),异重流平均排沙比为27%,中国黄河干、支流上的刘家峡、黑松林等水库,异重流排沙比可达55%~60%。

参考书目

钱宁,万兆惠.泥沙运动力学.北京:科学出版社,1983

(姜乃森)

yiliuba

溢流坝 (overflow dam) 坝顶部设有泄水孔口、兼作挡水和泄水的建筑物,也称滚水坝。它常设于混凝土坝或砌石坝上,属表孔泄水建筑物,由溢流堰、闸墩、胸墙、闸门、消能工等部分组成。溢洪坝作为主要的泄水建筑物,一般布置在河床坝段中,以利于消能防冲及与下游水流的平顺衔接。在消能区有时需设置导墙与相邻的电厂尾水渠、引航道等分隔开。当河道较狭窄时,也可采用溢流坝和发电厂房在河床重叠布置(见溢流厂房)。溢流坝平面布置见图1。溢流坝也是挡水建筑物,其剖面布置除满足水力学要求外,尚应满足挡水建筑物的稳定及应力要求。

溢流坝的类型 分为有闸门控制、无闸门控制和虹吸溢流坝三种。有闸门控制的溢流坝有开敞式的和在闸门上加胸墙的两种,剖面布置见图2。虹吸溢流坝是一种特殊的溢流坝,坝顶设虹吸管,见图3。当库水位超过正常水位时,虹吸管产生虹吸作用开始过水,当

舌轨迹拟定。设计中利用试验所得的经验公式,按定型水头来计算确定堰面曲线。定型水头一般稍小于堰顶

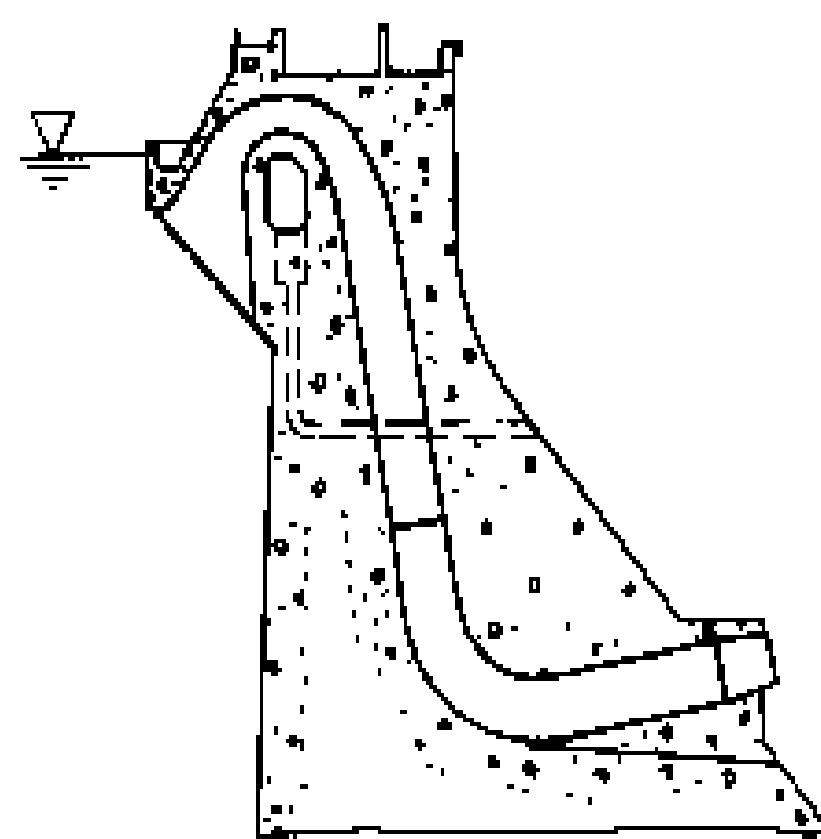


图3 虹吸溢流坝

控制条件。溢流坝的堰面曲线和下游坝坡相切,然后接反弧面进入下游消能工(挑流鼻坎、面流坎、消力屏或消力池等)。

闸墩和胸墙 闸墩用来承受闸门的推力。胸墙用来调整闸门设置的高程。它们的形状对溢流坝的泄流能力有影响。闸墩头部宜采用椭圆或抛物线形,以减少水流侧收缩对泄流能力的影响,闸墩尾部有尖尾墩、方尾墩和宽尾墩三种,见图4。尖尾墩有利于减少墩尾的冲击波;方尾墩有利于水流掺气;宽尾墩是中国近年来发展的一种新的消能设施,它扩大闸墩尾部的厚度,缩小堰面出流宽度,有助于加强消力池水跃消能效果,水流经宽尾墩收缩后流入消力池,形成三元水流的水跃,可以减小消力池尺寸,对屏流消能也可起到强化消能作用。这种型式的消能工已在中国安康、五强溪、岩滩等水电站

能力有影响。闸墩头部宜采用椭圆或抛物线形,以减少水流侧收缩对泄流能力的影响,闸墩尾部有尖尾墩、方尾墩和宽尾墩三种,见图4。尖尾墩有利于减少墩尾的冲击波;方尾墩有利于水流掺气;宽尾墩是中国近年来发展的一种新的消能设施,它扩大闸墩尾部的厚度,缩小堰面出流宽度,有助于加强消力池水跃消能效果,水流经宽尾墩收缩后流入消力池,形成三元水流的水跃,可以减小消力池尺寸,对屏流消能也可起到强化消能作用。这种型式的消能工已在中国安康、五强溪、岩滩等水电站

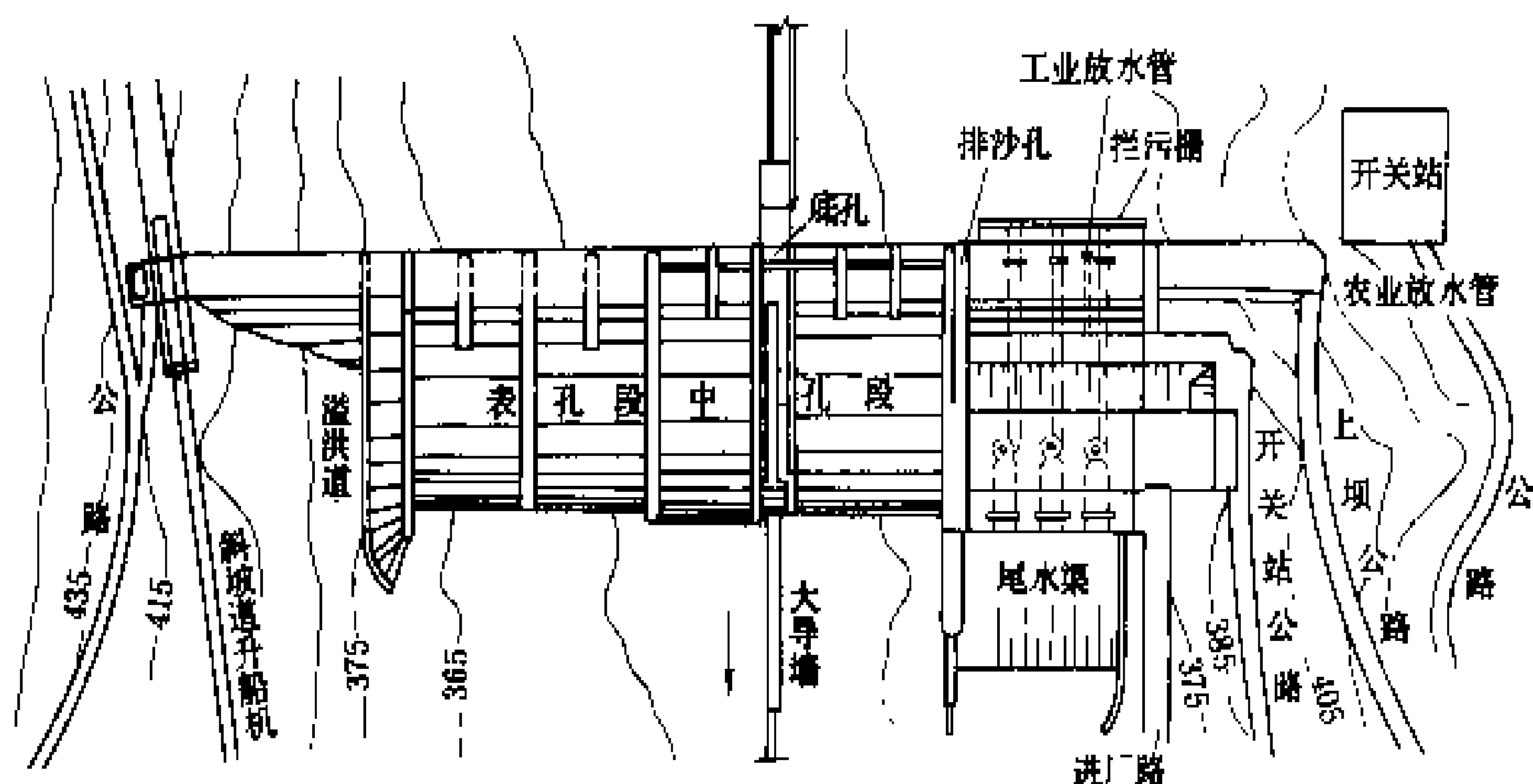


图1 溢流坝平面布置

水库水位下降到正常水位以下时,虹吸管内进入空气,破坏了虹吸作用,自动停止过水。这种溢流坝泄流量稳定,但泄量不大,只在中小型工程或压力前池中采用。

溢流堰面体型 它关系到溢流坝的泄流能力、流态稳定和压力分布均匀等问题,应通过水力计算、水工试验进行设计。溢流堰堰面曲线是按照通过堰顶的水

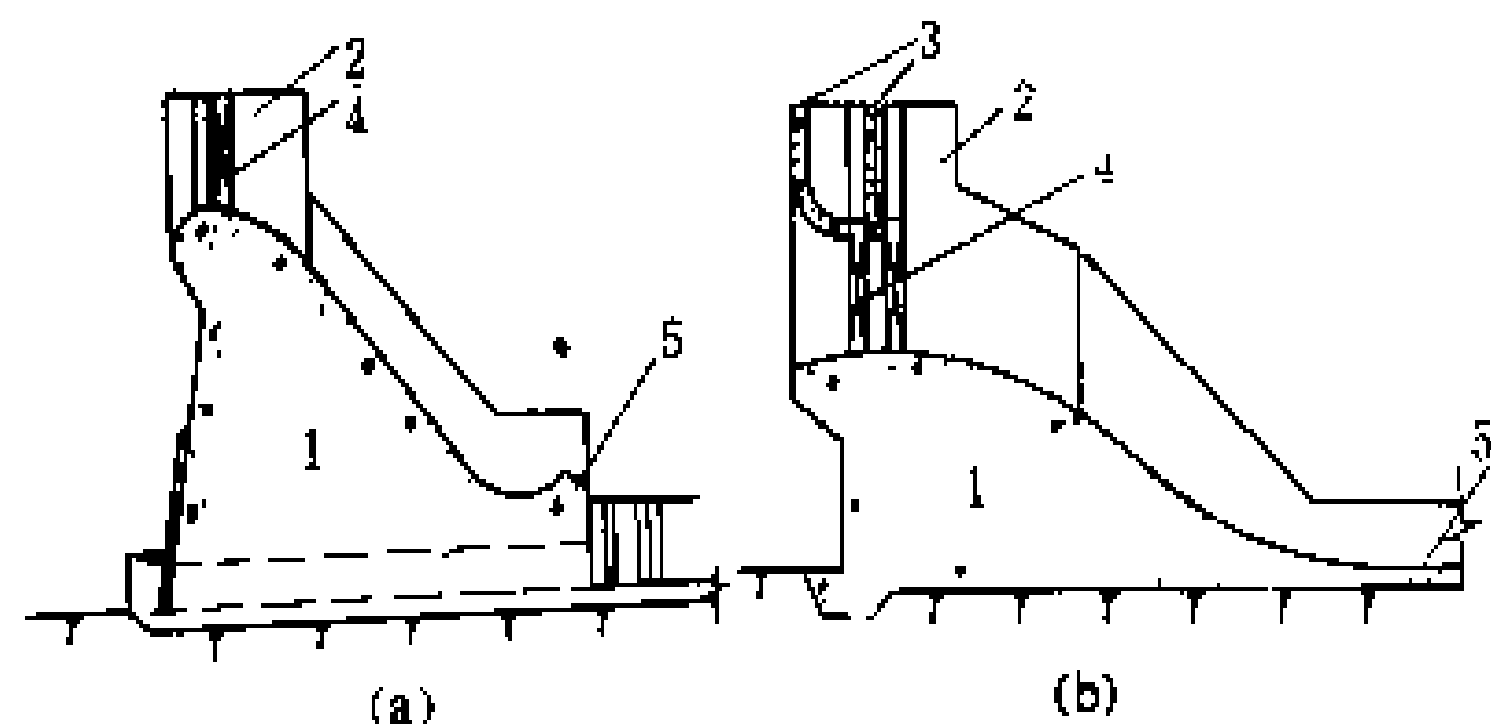


图2 溢流坝剖面图

(a) 开敞式溢流坝; (b) 有胸墙的溢流坝

1 溢流堰; 2—闸墩; 3 胸墙; 4—闸门; 5 消能工

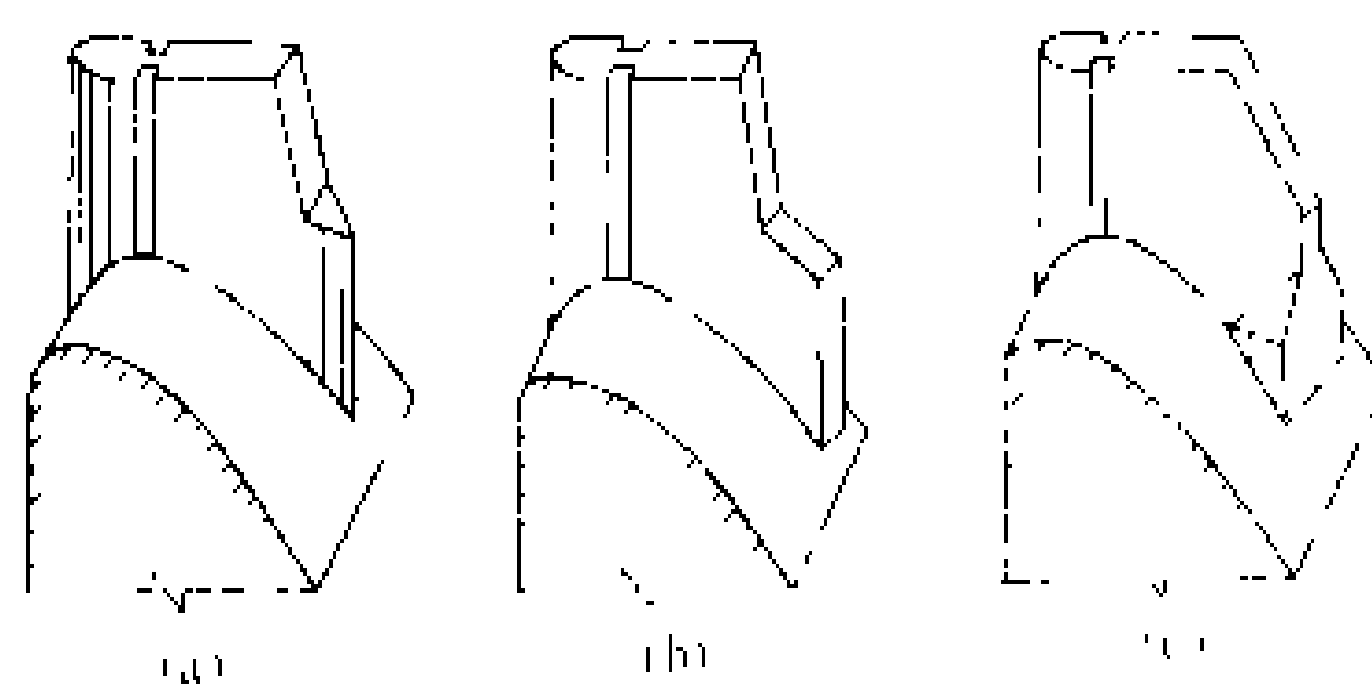


图4 溢流坝闸墩型式

(a) 尖尾墩; (b) 方尾墩; (c) 宽尾墩

工程中采用。宽尾墩也可应用于挑流消能,在中国潘家口工程部分溢流坝孔口试用。

溢流坝的闸门 见泄洪闸门。

水力计算 无胸墙溢流坝闸门全开时其泄流流量可用下式计算: $Q = mB \sqrt{2gH^{1.5}}$, 式中 Q 是泄流量;

B 是溢流堰净宽; H 是堰顶以上水头; g 是重力加速度; m 是流量系数。公式中泄流量和堰顶水头呈 1.5 次方的关系,说明这种溢流堰具有较大的超泄能力,从而可控制水库水位不大幅度上升,减少坝顶超高和库区淹没损失。有胸墙的溢流坝其泄流能力在高水位孔口被淹没时为孔口出流,而在低水位孔口未被淹没时为自由堰流,当堰顶水头变化时会出现堰流到孔口流的过渡现象,其泄流量和水头的关系要通过试验测定。虹吸溢流坝的泄量取决于虹吸管的落差,但落差不能太大,以免管道内发生真空。

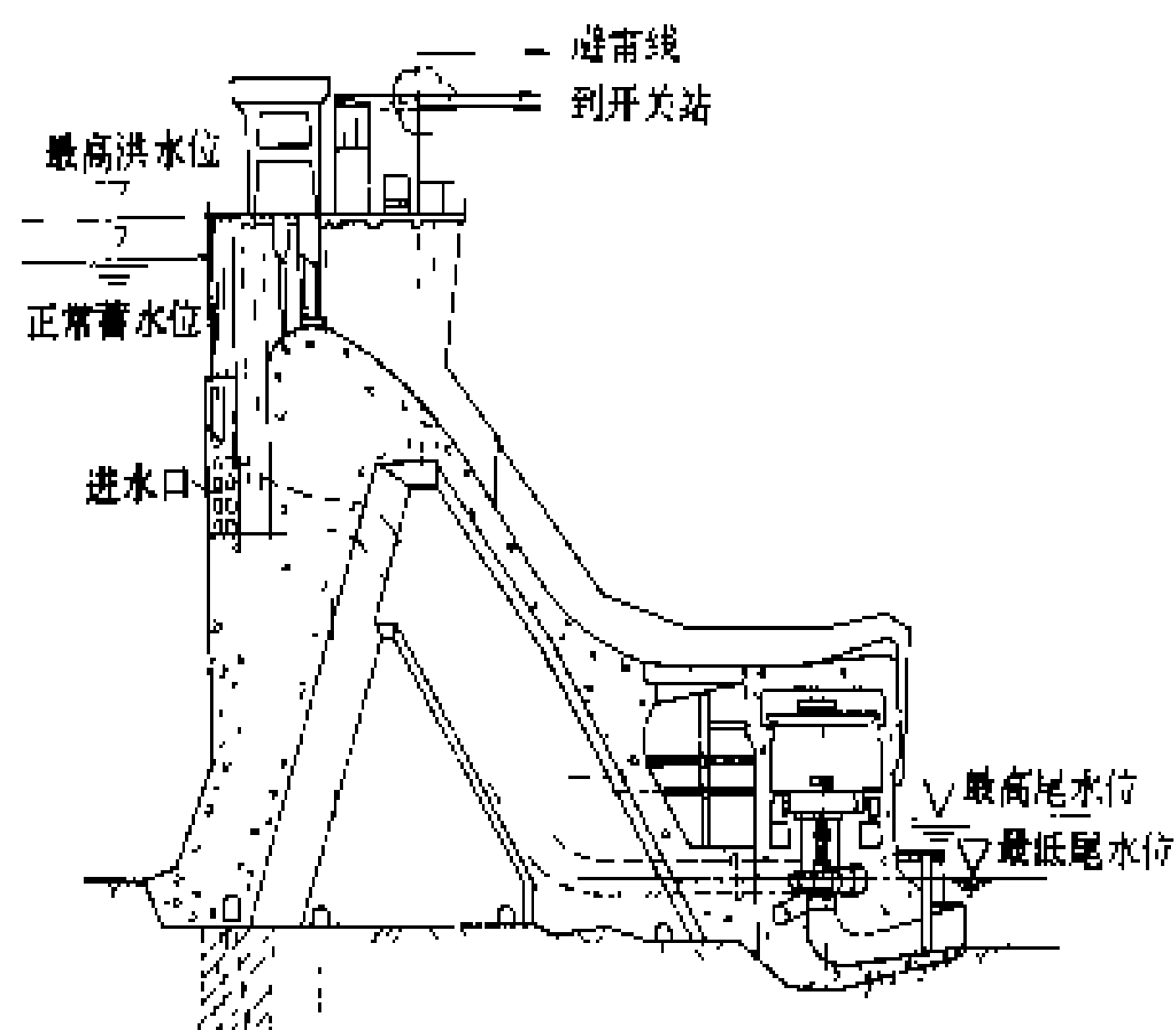
运行方式 无闸门控制的溢流坝和虹吸溢洪道的堰顶与水库正常蓄水位齐平,超过正常水位即可过水,无需人为控制。由于水库的调蓄作用,其下泄流量不会大于入库洪峰流量,且结构简单,运行管理方便可靠,但泄流时水位壅高较大,一般在中小型工程中采用。有闸门控制的溢流坝堰顶低于水库正常蓄水位,堰顶以上由闸门挡水,利用闸门开启度控制下泄流量,泄流能力较大。泄洪操作时可将所有闸门按同一开度开启,也可只开启部分闸孔以调节下泄流量,但要尽量对称开启以利下游流态稳定。

(林可冀)

yiliushi changfang

溢流式厂房 (overflow type power house)

位于混凝土溢流坝坝趾下游的水电站厂房。坝上溢下的水流经过厂房顶泄入下游河道(见图)。



溢流式厂房横剖面图

水库下泄洪水流量大,河床狭窄,溢洪与发电分区布置有一定困难时,溢流式厂房有时是可采用的方案。中国 50 年代末建成的这种厂房有新安江水电站。溢流式厂房可用于各种型式的混凝土坝,如重力坝、拱坝、支墩坝。大中型水电站安装的水轮发电机组多为立轴混流式,发电引水进水口布置类似坝后式厂房,压力管道埋设于坝体内。按泄水条件,溢流式厂房有厂顶溢流

式和厂前挑流式两种类型:

(1)厂顶溢流式厂房。厂房顶板全部或部分兼作溢洪道泄槽,引导水流泄入下游河道,泄槽体形需要根据水力学原理设计,并通过水工模型试验优化,当水流速度很高时(例如超过 20 m/s),过流面易遭气蚀破坏,要采取提高过流面平整度、掺气减蚀等措施。

(2)厂前挑流式厂房。厂房位于溢洪道挑流鼻坎下游,坝上泄下急流经鼻坎挑起,跃过厂房屋顶落入下游尾水渠。然而,当渲泄小流量和溢洪道闸门开启与关闭过程中,水舌难免落到厂房屋顶,所以厂房结构要具备耐受这种工况下的水流冲砸。这种泄水方式有中国乌江渡水电站。

厂房与坝体的连接方式有如下几种:①厂坝整体连接;②厂坝完全分开,厂房独立承受外载荷;③厂房下部结构与坝体整体连接,上部结构与坝体分开;④厂房下部结构与坝体分开,上部结构与坝体连结。采取何种方式,根据基础地质条件、坝型及坝高,厂房稳定和抗振性能,经技术经济比较确定。

溢流厂房多为封闭式,避免泄洪水流雾化对厂内影响。厂房结构刚度能经受各种工况水流的作用力,结构的自振频率一般大于水流的脉动优势频率不致引起共振现象。溢流板下厂坝之间通常有较大空间,可利用布置副厂房,有的还布置主变压器及开关站。主变压器场、开关站也有的布置于坝顶或坝下游岸边,视地形条件而定,但设计中要注意避开水流雾化区。厂房对外交通一般采用下游岸边公路或铁路,路而要高出下游最高洪水位并避开溢流溅落区,当布置上有困难时可改用交通隧洞进厂。岸边公路或铁路穿过水流雾化区严重地段要设防护廊道,但泄洪概率较少的水电站,允许中断临时改由其他通道的也可不设防护廊道。

溢流厂房的运行条件类似坝内厂房,采光及自然通风条件差,主要依靠人工照明和机械通风。溢流可能引起河床的冲刷和淤积,要加强岸坡保护。

(李必如)

yinshui fangsha

引水防沙 (preventive measures against siltation in diversion work)

防止泥沙进入引水口的措施。在多沙河流上引水,无论是有坝引水还是无坝引水,都会有部分泥沙随水流进入引水系统,如果处理不当,会造成引水系统的淤积及水轮机过水部件磨损。

由于悬移质泥沙与推移质泥沙的运动规律不同,防止泥沙入渠的措施也不一样。处理悬移质泥沙常用的办法是在渠首或干渠上修建沉沙池,使澄清后的水进入引水系统。防止推移质泥沙进入引水渠道的主要



措施是在渠首设置冲沙闸、拦沙坎,使之能阻止绝大部分泥沙进入。

引水渠首可分为有坝引水与无坝引水两大类。

无坝引水常布置在弯曲河段下端凹岸,引表层清水入渠。无坝引水不适宜两岸引水,且引水比不宜太大。

有坝引水的型式很多,主要有人工弯道式、印度式、底栏栅式等。

(1)人工弯道式.特点是在渠首上游修建一人工弯道,并将引水渠首布置在弯道凹岸,利用弯道环流排沙,引用表层清水(见图1)。

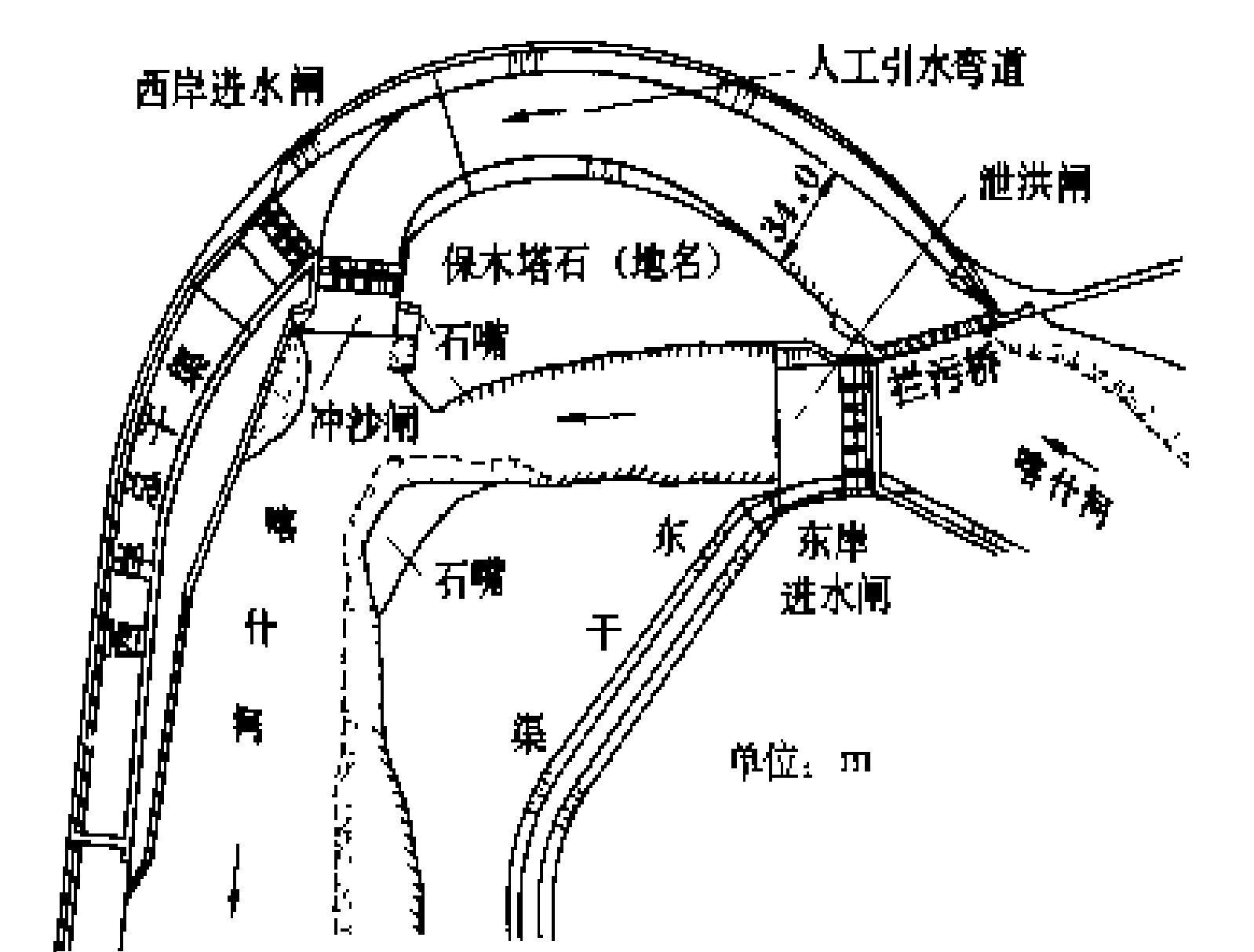


图1 喀什河渠首布置

(2)印度式.渠首侧面引水,正面排沙。在进水闸前设置沉沙冲沙槽,在冲沙闸关闭期间起沉沙池的作用。冲沙槽内淤积的泥沙,需要定期冲洗。

(3)底栏栅式.适用于粗颗粒较多的山区河流。利用布置在引水渠首顶部的栏栅,把粗颗粒卵砾石拦截在栅条上,较清水流通过栅条进入廊道取水口(见图2)。底栏栅式渠首结构简单,工程量小,但粒径小于栏栅间隙的泥沙仍会进入引水口,且栏栅易堵塞。

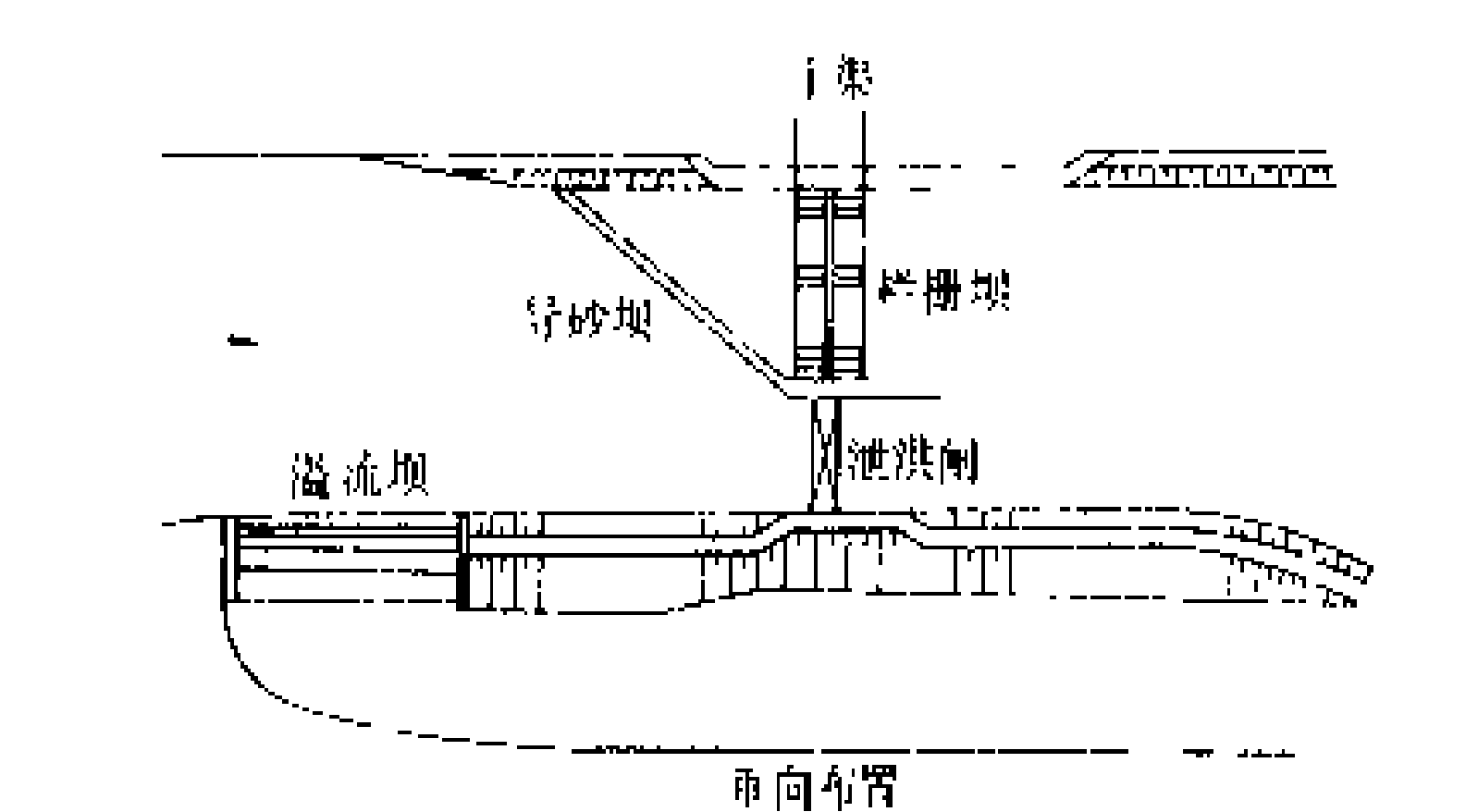


图2 底栏栅式渠首建筑物的布置

无论那种型式的渠首,都难免有少量泥沙进入,常需对这部分泥沙进行再处理。常用措施有:在进水闸下游设置挡沙坎拦沙,利用冲沙闸或冲沙廊道排沙;如地形适宜可设置曲线沉沙池,利用横向环流把泥沙推往

沉沙池的凸岸,由排沙廊道排走。如果沉积的沙量不多,也可用机械清淤。

(姜乃森)

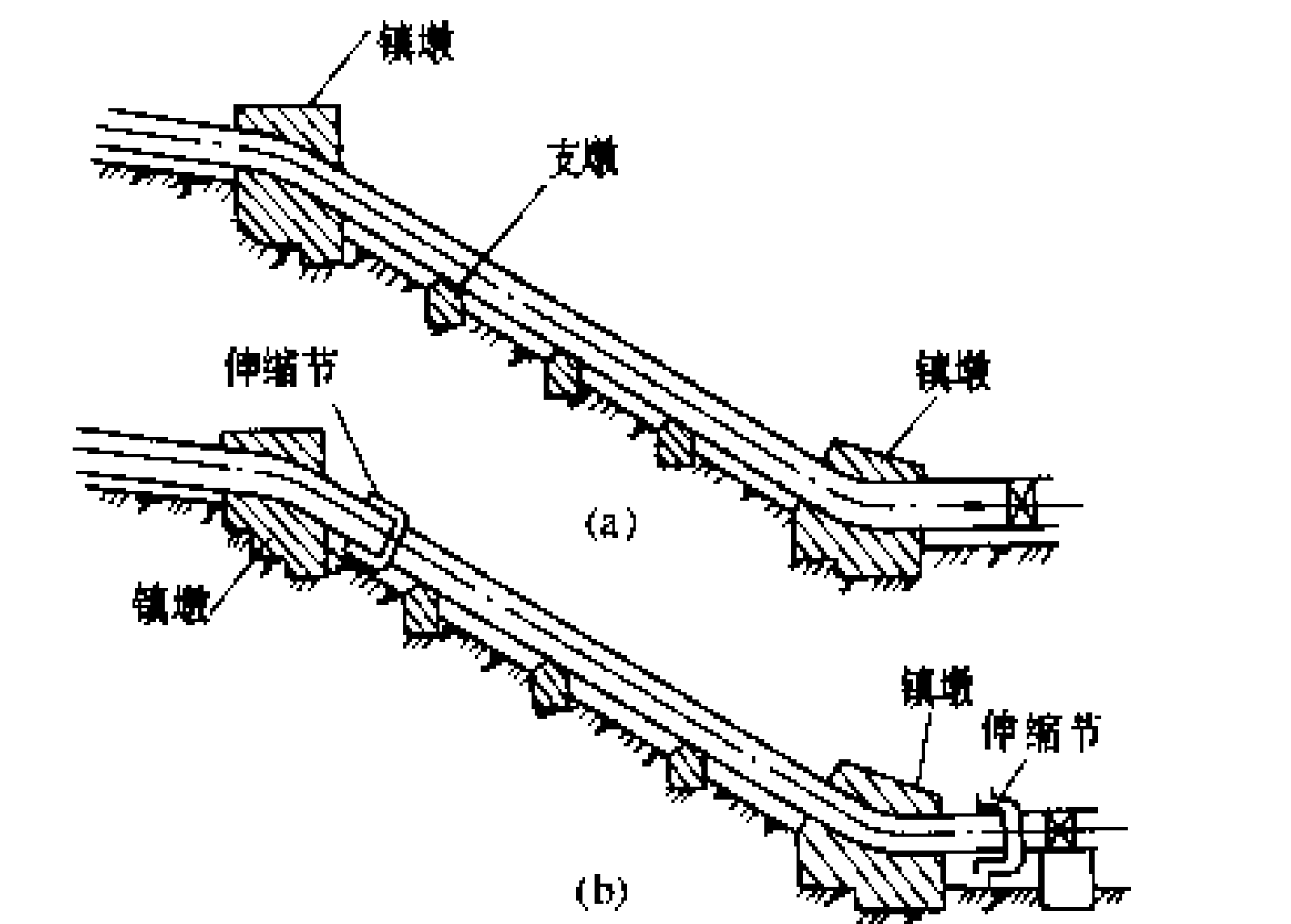
yinshui mingguan

引水明管 (diversion pipe) 敷设于地面的有压引水道。管内为有压流,适用于引水式小型水电站。它一般沿等高线布置,纵向坡度较小。管线应避免过大的起伏。可架设于支墩和镇墩上,也可铺设于混凝土座垫上。常用的引水明管有钢管、钢筋混凝土管和木管三种。

钢管 由钢板焊接而成,强度高,钢材多用镇静钢,管壁要涂防锈漆保护。钢管多架设于镇墩和支墩上。其敷设方式分为连续式和分段式二种。

(1)连续式.管身在镇墩间是连续的,其间不设伸缩节,如图中(a)。这种方式在温度变化时,由于镇墩的固定作用,管壁将出现较大的轴向温度应力。

(2)分段式.在两镇墩间设伸缩节,将管身分段,如图中(b)。当温度变化时,管道可以伸缩,其轴向力仅为管道与支座及伸缩节的摩擦力。



钢管敷设方式

(a) 连续式; (b) 分段式

为了减小管跨长度,在镇墩间设置支墩,支墩只起支点的作用,不固定钢管可减少管壁纵向应力,并可减小伸缩节漏水。支墩上设有金属垫板或支座,以减小摩擦力。支墩用浆砌石或混凝土建于地基上。

钢筋混凝土管 分现场浇筑和预制两类。预制管又分普通钢筋混凝土管与预应力钢筋混凝土管两种。普通钢筋混凝土管适应水头在50m以下,水头 H 与管径 D 的乘积 HD 值不超过 50 m^2 。管壁厚一般为8~25 cm。预应力钢筋混凝土管能承担较高内水压力, HD 值可达 2000 m^2 。它是由高强度钢丝加力缠绕在膨胀水泥制做的混凝土管芯外面,其外面再喷一层水泥砂浆保护。它比普通钢筋混凝土管抗裂性能好,充分发挥了钢丝的强度。钢筋混凝土管通常铺设于混凝土座

垫上，要做好管段间的接缝止水。

木管 其管壁由木板拼成，板间做榫槽，壁外用钢箍箍紧。它通常只适用于小型水电站。其 HD 值小于 200 m^2 。它构造简单，管壁传热性低，无需设伸缩节，管壁光滑，摩擦损失小。但容易漏水，木材需做防腐处理，使用年限短。钢箍所需钢材与钢管相差无几，故目前已很少采用。

(刘维德 王树人)

yinshui mingqu

引水明渠 (diversion channel) 引水式水电站将水引至压力前池的渠道。渠道纵坡平缓，渠内水流流速低，在一定条件下，它是一种较经济的无压引水建筑物，多用于小型水电站。

设计原则 ①无压引水式水电站由引水明渠集中落差。因此，明渠纵坡应比天然河道纵坡小得多，一般为 $1‰\sim 0.20‰$ 。明渠线路沿等高线布置，渠线上不应有陡坡跌水。渠线宜顺直，转弯半径宜大于渠水面宽的五倍。②由于在填方上建渠道易漏水及塌滑，故渠道应尽量建于挖方中。渠道选线尽量躲开塌方、滑坡、漏水地段，并尽量少修渡槽、隧洞等造价昂贵的建筑物。③渠道横断面常为梯形和矩形，边坡坡度根据地基岩土及护坡的稳定条件确定。渠顶应超过涌浪高度，并有一定安全超高。④渠道的水流速度，限制在不冲、不淤的流速范围内，土渠多采用 $0.6\sim 0.9\text{ m/s}$ ，衬砌渠道及需要输冰渠道多采用 $1.2\sim 1.5\text{ m/s}$ 。⑤渠线上根据需要设置泄水、拦污、排沙、排冰等设施。⑥为了减少渗漏，降低糙率，防止冲刷，提高流速，增加边坡稳定性等，用合适材料做渠道衬砌。

渠道衬砌 渠道衬砌材料有：混凝土、钢筋混凝土、沥青混凝土、干砌石及浆砌石等。混凝土衬砌是最常用的一种，分整体浇筑和预制板块铺砌两种。整体浇筑的衬砌一般厚度 $8\sim 12\text{ cm}$ 。一般设温度伸缩缝，间距 $2\sim 5\text{ m}$ 。预制板常做成正方形，一般厚度 $6\sim 8\text{ cm}$ 。在混凝土衬砌下设排水垫层，以排走衬砌下的有压渗水，防止渗水上抬衬砌。排水垫层用砂砾石做成，厚度一般约 $0.3\sim 0.4\text{ m}$ 。当渠道衬砌设排水孔时，需按反滤层要求设置两层垫层。

(刘维德 王树人)

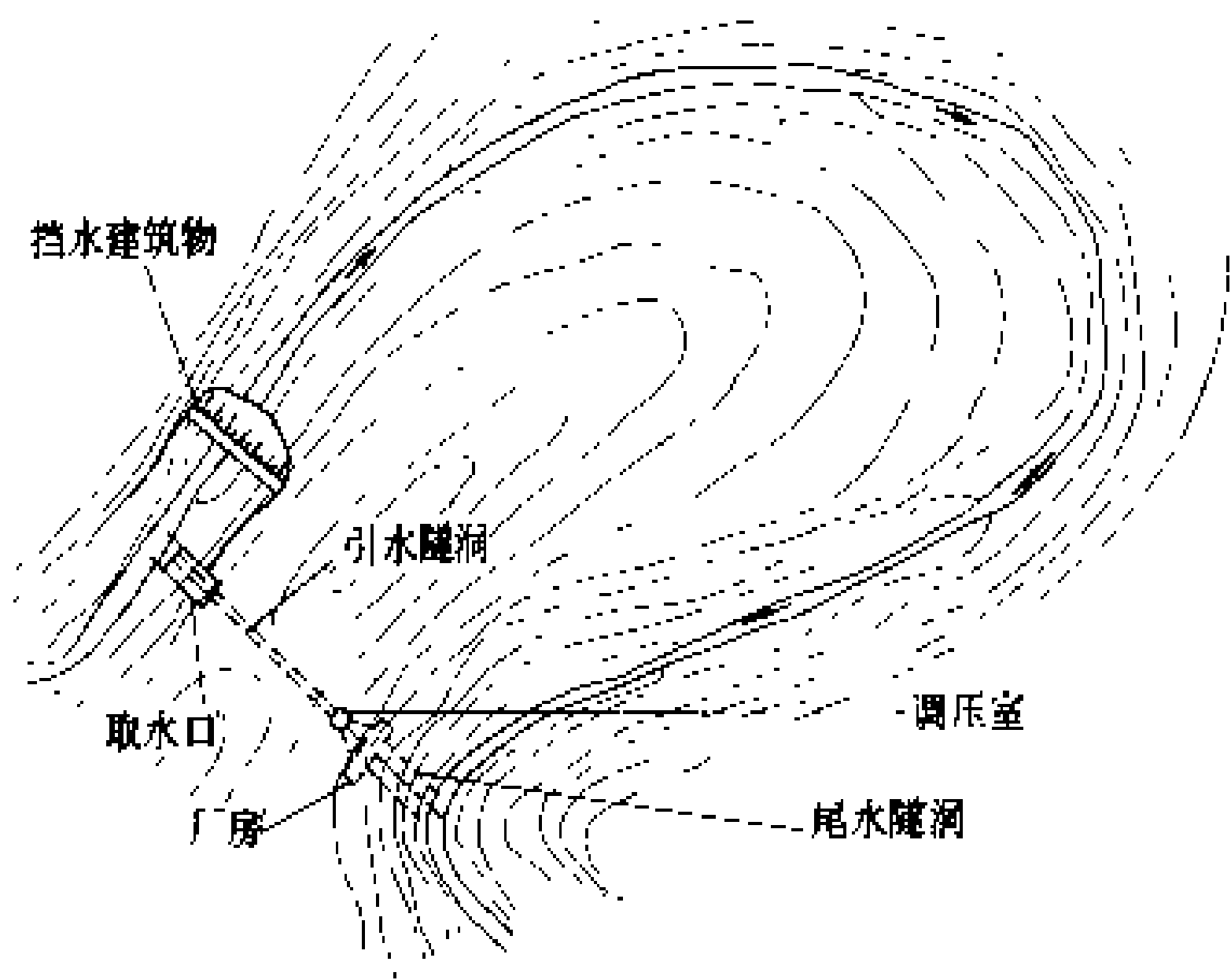
yinshuishi shuidianzhan

引水式水电站 (diversion type hydropower station) 利用天然河道落差，由引水系统集中发电水头的水电站。引水式水电站一般由挡水建筑物、泄水建筑物、进水口、引水系统、水电站厂房、尾水隧洞(或尾水明渠)及机电设备等组成。引水式水电站适

宜建在河道多弯曲或河道坡降较陡的河段，用较短的引水系统可集中较大水头；也适宜于高水头水电站，避免建设过高的挡水建筑物。跨流域引水发电的水电站必然是引水式水电站。

引水式水电站的主要特点有：①库容小，调节性能差；②淹没损失少；③产生脱水河段，至少使局部河段减少流量；④枢纽布置分散，不利于运行管理。

引水式水电站分为有压与无压两类。无压引水式水电站用无压引水道(引水明渠或无压隧洞)输送水流到压力前池，压力前池把水流由无压变成有压，通过压力管道把水引到水轮发电机组发电。有些无压引水式水电站还要设尾水明渠。这类电站靠压力前池或靠明渠小范围水位变化调节引水流量，但可调蓄的容积很小，调节性能很差，多为径流式水电站，如中国新疆的玛纳斯梯级水电站。有压引水式水电站用有压隧洞或钢管从进水口输送压力水流到厂房，有些电站还要设置调压室。有压引水式水电站的厂房位置可放在岸边、地下或地上。若采用地下式厂房还可分为首部式、中部式或尾部式。首部式的引水隧洞短于尾水隧洞，尾部式的引水隧洞长于尾水隧洞，中部式的厂房位于中间。中国以礼河三级和四级水电站为有压引水式水电站，利用水头均为 629 m 。引水式水电站的布置见图。



引水式水电站布置图

因坝式水电站和引水式水电站各有优缺点，在适宜的条件下有些水电站既用挡水建筑物、又用引水系统共同集中发电水头，既有水库可调节径流，又可用较少的引水系统工程量取得较大水头。这类水电站称为混合式水电站，如中国的鲁布革水电站。

(欧阳华)

yinshui suidong

引水隧洞 (diversion tunnel) 在山体内开挖成的引水道。按洞内水流有无自由水面，引水隧洞分

无压和有压两种。选择洞线时一般要求洞线短,转弯少,并便于布置施工支洞,同时尽可能地要求通过的岩体地质构造简单,岩体完整,地下水位低。为综合满足以上要求,洞线常为曲折状。其断面尺寸由技术经济比较决定。一般,先假定几个隧洞断面尺寸方案,计算其水头损失、出力损失和年电能损失。将各方案的一次投资和正常运行期的年运行费按复利折算到某一基准年,选用计算期内总费用最小的方案。其纵向坡度一般在1‰~5‰范围内。

无压引水隧洞 无压引水道的一种,当引水渠线遇到高山等不利情况时采用,具有自由水面,其断面形状多为圆拱直墙型或马蹄型,见图1。其断面高宽比为1~1.5。在岩石侧压力小或水位变化较大时,可选择较高的断面。水面至洞顶要留有一定的空间,以避免明、满流交替。

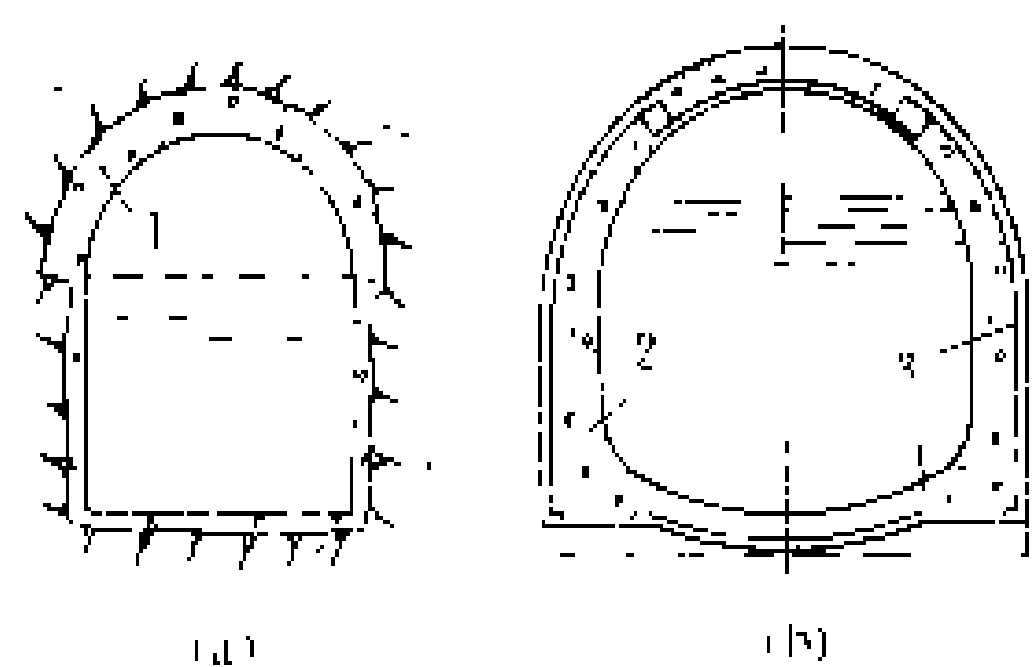


图1 无压引水隧洞断面实例

(a) 圆拱直墙型; (b) 马蹄型

1—混凝土; 2—钢筋混凝土; 3—受力钢筋

有压引水隧洞 有压引水道的一种。其断面形状一般为圆形,见图2。其承受内、外水压力的性能较好。湿周短,水头损失小。

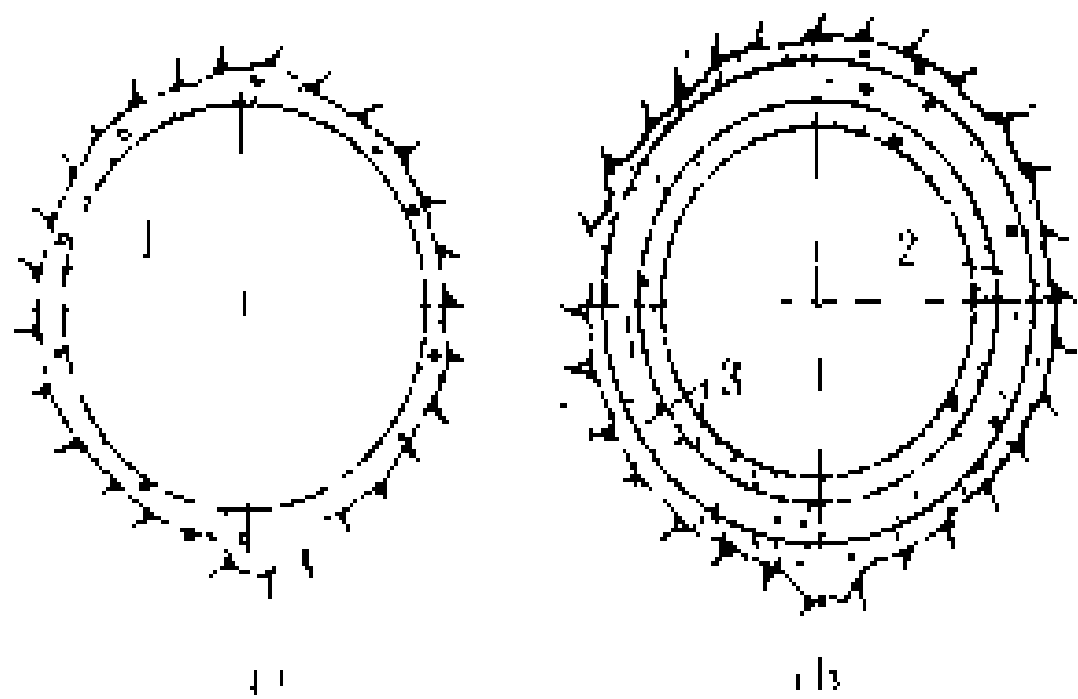


图2 有压引水隧洞衬砌

(a) 混凝土的衬砌; (b) 钢筋混凝土的衬砌

1—混凝土; 2—钢筋混凝土; 3—环形受力钢筋

隧洞衬砌 引水隧洞重要的组成部分。其作用是承担内、外水压力和山岩压力、减小渗水、防止岩体崩塌和降低糙率。除岩体坚硬、致密和完整的地段外,一般都要做衬砌,主要有混凝土、钢筋混凝土和锚杆喷混凝土三种衬砌类型,见图1、图2。当围岩较完整,内水压力不大时,可采用混凝土衬砌;当内水压力较大,围岩较差时,应采用钢筋混凝土衬砌;当围岩完整,透水性弱,可把围岩视为受力结构,不做衬砌或采用锚杆

喷混凝土衬砌。衬砌常设纵横缝、缝间设止水。衬砌与岩石之间做回填灌浆和排水。岩石中做固结灌浆。

(刘维德 王树人)

yinshui xitong

引水系统 (water conveyance system)

从水库或河流引水至水轮机的取水、输水等水工建筑物的总称。依水电站型式和地形、地质条件,引水系统包括水电站进水口、引水道、压力前池、调压室及压力管道等建筑物的一部分。引水道是连接水电站进水口和调压室(或压力前池)之间的水道,主要用于集中发电水头。引水道的类型有引水隧洞、引水明管、引水明渠等。习惯上从尾水管至下游河道的尾水渠(隧洞)和尾水调压室亦可包括在引水系统之内。引水系统可分为坝式引水系统、无压引水道式引水系统和有压引水道式引水系统三种。引水系统要求水流平顺,运行稳定。引水道内的水流流速宜为经济流速,即该流速使引水道的投资和电能损失的总费用为最小,引水道的断面需考虑施工条件,由技术经济比较决定。

坝式引水系统 由有压进水口及压力管道组成,它适用于坝后式、坝内式、溢流式等型式厂房。一般一条压力管道供水给一台水轮机。水由有压进水口经压力管道引向水轮机。进水口设于坝的上游面,设有拦污栅、事故闸门和检修闸门。压力管道全部穿过坝体的称坝内管,如丰满水电站的压力管道;上部穿过坝体,下部安装于坝的下游面或坝体下游面的管槽内称坝后背管,如东江水电站的压力管道;进水口后的压力管道沿坝上游面敷设,至靠近底部然后水平穿过坝体的称坝前引水管,如凤滩水电站和牛路岭水电站的压力管道。坝式引水系统的纵剖面示意图分别见坝内管、坝后背管、空腹坝。

无压引水道式引水系统 由开敞式进水口、无压引水道、压力前池和压力管道组成。它适用于无压引水道式水电站。水由开敞式进水口经明渠或无压隧洞引至压力前池,由压力前池分水经压力管道引向水轮机,这种型式的厂房多为地面厂房,厂房下游设有尾水渠,其布置如南桡河水电站(见水电枢纽)。这种引水系统各组成部分的作用如下。

(1) 开敞式进水口,作取水用,设有拦污栅和闸门。当泥沙入渠较多时应设沉沙池及排沙措施。

(2) 无压引水道可为明渠或无压隧洞,其中水流具有自由水面。它利用地形引水至压力前池形成落差。明渠常设置于地形平缓,沟壑较少,山坡稳定的地段。当引水线路遇到高山、陡坡、滑坡等地段,常采用无压隧洞。

(3) 压力前池。它起分配水量至压力管道的作用。

它位于无压引水道末端,要有一定的容积,当负荷变化时可补充和蓄纳水量。根据需要设泄水道、排水道和排沙道。

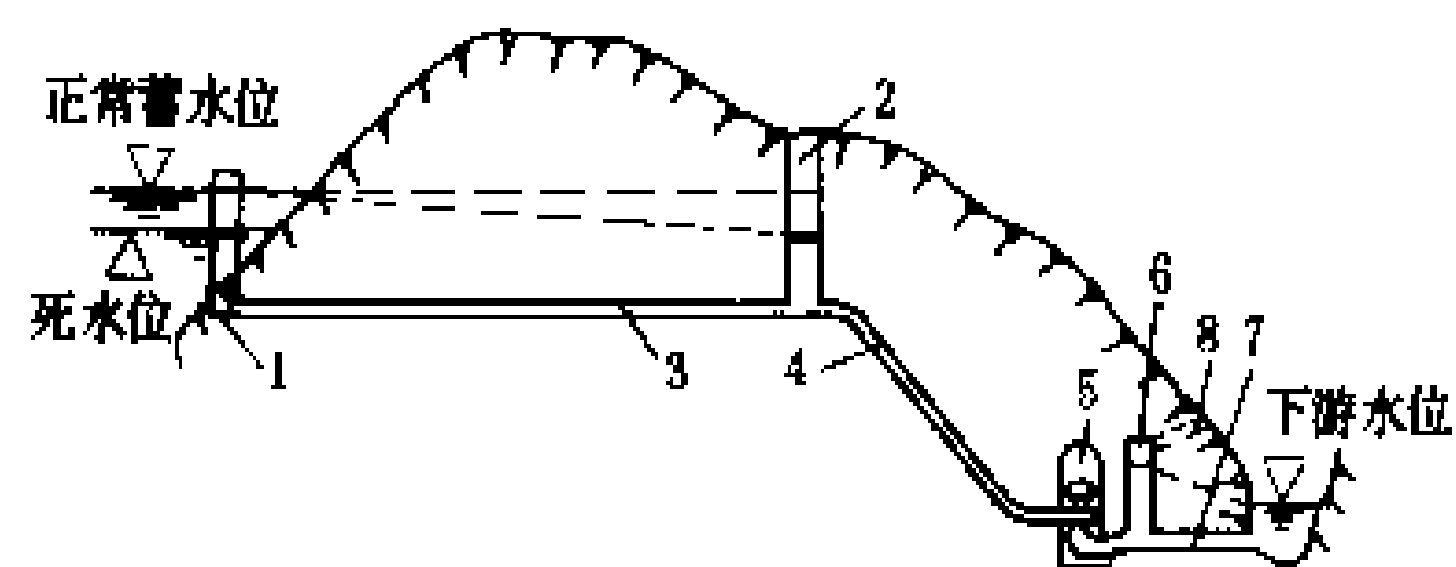
(4) 压力管道。它起输水作用。根据地形地质条件可为明管或隧洞。其进口应设拦污栅和事故闸门。布置形式有一条压力管道为一台水轮机供水或由一主管经支管向多台水轮机供水,在支管上要设阀门,以利机组检修和运行。

有压引水道式引水系统 由有压进水口、有压引水道和压力管道组成。当管道较长时要设调压室。它主要适用于有压引水式和混合式水电站,这类引水系统的纵剖面示意图如图。各组成部分的作用如下。

(1) 有压进水口作取水用,设有拦污栅、事故闸门和检修闸门。

(2) 有压引水道有引水隧洞和引水明管、埋管等类型,其中水流为有压流。它有形成落差和引水的作用,多分段直线布置,纵向坡度较缓。

(3) 调压室设于引水道末端,有减小水击压力作用。其断面要满足波动稳定要求,其容积要满足负荷变化时储水和补水的要求。有时在调压室内要设事故闸门。



有压引水道式引水系统纵剖面示意图

1—进水口; 2—上游调压室; 3—引水道; 4—压力管道;
5—水电站厂房; 6—尾水调压室; 7—尾水隧洞; 8—通气竖井

调压室下游为压力管道,其作用与布置和无压引水道式相同。如为地下厂房,当尾水隧洞很长、尾水位很高时,还设有压尾水隧洞和尾水调压室。

(刘维德 王树人)

yinshui xitong chongshui

引水系统充水 (water filling to diversion system) 在水轮发电机组启动试运行中,用水充满引水建筑物对施工和安装质量进行验证的试验工作。当水电站具备启动试运行条件时引水系统即可进行充水试验。试验内容包括主引水管道充水试验、闸门和蝴蝶阀或球阀试验、工业用水管路充水试验和排水试验。

主引水管道充水试验 利用水库的水对主引水管

道进行充水试验,检查各个部位有无漏水。不同类型的水电站有不同的主引水管道,通常包括水电站进水口、引水明渠(管)、引水隧洞、调压室、压力管道、闸门或蝴蝶阀、球阀、蜗壳和尾水管等。主引水管道充水是水轮发电机组启动试运行的前提,只有主引水管道充水试验通过,才能进行水轮发电机组空载试验和水轮发电机组带负荷试验。充水试验一般分两个步骤进行。首先利用尾水充水阀从下游将水引入尾水管内,在尾水管充水过程中随时检查水轮机的顶盖、导水机构、轴承密封和测压系统管路、进入门等处的漏水情况和测压表的读数。如发现异常情况,需放空处理,可立即关闭充水阀,并打开尾水管的排水阀门通过排水泵向尾水渠排水。如尾水管充水无异常情况,在尾水闸门两侧压力相等时可开启尾水闸门。第二步从进水口向引水系统充水,对于一般水电站首次充水要缓慢进行以便排气及检查,因此可将进水口闸门的充水阀或旁通阀打开一半。当水流入引水管道后,在厂房内从引水管道上的压力表读数逐渐上升至实际水头时,说明主引水管道水已充满。在充水过程中要检查伸缩节、蝴蝶阀或球阀、闷头及管道焊缝有无漏水情况。若蜗壳前没有装设蝴蝶阀或球阀,则引水管道充水时,水直接流入蜗壳,此时要检查水轮机顶盖、导水叶上部轴承等处有无漏水情况。在充水过程中要检查引水管道的通气孔、蜗壳排气阀排气是否畅通。长引水隧洞充水时,要防止隧洞排气时冲击进水口设备。对于抽水蓄能电站,如上水库无天然水源,则可从其他水源充水。

闸门和蝴蝶阀或球阀试验 在主引水管道充水试验检查合格后,用手动和自动方式在静水中进行闸门的启闭试验,检查启闭机及闸门的工作情况。如装有蝴蝶阀或球阀,则通过旁通阀向蜗壳充水,然后在静水中以手动和自动方式进行蝴蝶阀或球阀的启闭试验。试验时记录闸门、蝴蝶阀或球阀的开启和关闭时间。

工业用水管路充水试验 对于从引水管道取水的工业用水系统,当引水管道充满水后,可打开工业水管路的阀门调整水压,使压力水通至冷却水、润滑油、消防水等系统,检查各部位的漏水情况和自动化元件的动作情况。对于直接从水库取水或从尾水用水泵供水的工业用水系统,用类似上述充水的办法进行试验。(见水电站供水系统)

排水试验 主引水管道充水后,无论是正常情况排水,或处理缺陷需要排水,可先将进水口闸门关闭,然后开启引水管道和蜗壳的排水阀,主引水管道的水就可以经尾水管排到下游去。在充水试验过程中,有时由于引水管道较长,又遇到紧急情况需要排水时可立即启动机组,使水经水轮机排至下游。需要注意的是机组应具备启动条件,并要注意机组安全启动不致造成



事故。

(王 冰)

yongshui

涌水 (water surge) 在地下水面以下岩(土)体中采矿、开挖基坑或地下洞室时,地下水不断地流入场地的现象。这是工程建设中常遇到的工程地质问题。涌水不仅给施工带来困难,并且也是造成地下洞室围岩塌方、大坝基坑渗透破坏或边坡塌滑的重要原因。如中国京广铁路的大瑶山隧洞,在施工中遇到规模大的断层破碎带或喀斯特发育的地段,均发生挟带泥沙的大量突然涌水,并且随着地下水的涌出,塌方频繁发生,严重影响施工的顺利进行。

涌水的发生 突发性的涌水多发生在喀斯特发育的石灰岩地区(尤其有地下暗河系统)、规模大的断层带或透水性强烈的砂砾层以及基坑下卧有承压含水层等地区。据中国煤矿的调查资料,百分之九十以上的突发性涌水发生在断层破碎带中。并且有的突发性涌水具有充沛的水源补给,其主要渗透通道与地表水或地下暗河或其他含水层有着良好的水力联系。

涌水的勘察 在可能有突发性涌水地区修建工程,需要进行工程场地及其毗邻地区的地质及水文地质环境的调查,查明含水层分布、厚度、埋藏条件、渗透性能以及补排关系。在喀斯特地区尚需查明喀斯特发育程度,充填情况,喀斯特水的分布及其运动特征等。在分析上述资料的基础上,选用合适的计算方法(如类比外推法、解析法、数值法和水均衡法等)预测基坑或地下洞室可能发生集中涌水的地段和涌水量,并评价涌水对工程的影响。

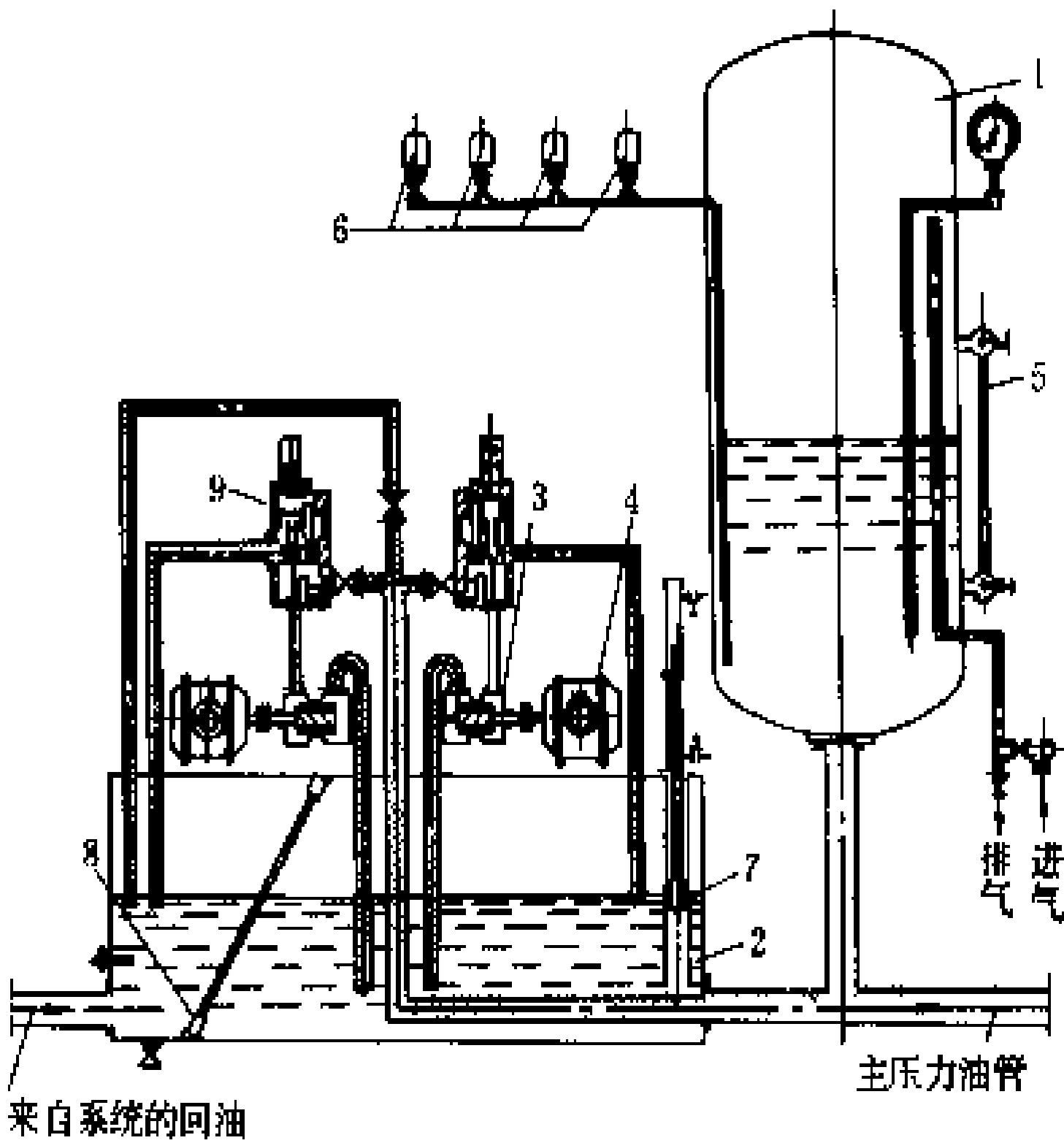
涌水的防治 除采取排水措施降低地下水位外,对于涌水量较大的溶洞、断层破碎带或砂砾层可进行帷幕灌浆,以封堵地下水的渗流通道。

(邹小安)

youya zhuangzhi

油压装置 (oil pressure system) 向水轮机调速系统、进口阀、调压阀及其他液压操作元件供给操作压力油的设备。油压装置的压力常用 2.5 MPa、4.0 MPa 和 7.0 MPa。随着机组容量的增大和制造水平的提高,工作油压有提高的趋势。油压装置由压力油罐、回油箱、油泵及其驱动装置、压缩空气补给装置和保护设备等部件组成(见图)。①压力油罐是一个圆筒形承压容器,用来储存油和压缩空气。其中 30%~40% 的容积为油,其余为压缩空气。压力油罐上还装有用于油泵和自动补气控制的压力信号器和用于监视的油位计等器件。②回油箱是一个长方形的贮油器,用来

汇集调速系统工作后的回油及漏油以及向压力油罐供油。回油箱由一个滤油网分隔成污油和清洁油两个油区。箱上还装有油位指示器等附件。③油泵及其驱动装置是把油从回油箱向压力油罐打油。油压装置一般装设有两台齿轮泵或螺杆泵及油泵附件。两台油泵互为



油压装置系统图

- 1 压力油罐; 2—回油箱; 3 油泵; 4—电动机; 5 油位计; 6 压力信号器; 7—油位指示器; 8—滤油网; 9—安全阀组

备用。油泵除少数直接由水轮机驱动外均由异步电动机来驱动。主油泵的工作方式有持续运转和断续运转两种方式。采用持续运转方式时,油泵供给压力油罐的压力油由卸载阀进行切换。采用断续运转方式时,油泵的启停由装在压力罐上的压力信号器控制。④压缩空气补给装置用于向压力罐补充压缩空气以保证压力油罐内正常的油气比例。在水轮机调速器工作过程中,会有一定数量的压缩空气漏掉或溶解于压力油中被带走。因此需要设置压缩空气补给装置来经常向压力油罐补充压缩空气。压缩空气来自水电站压缩空气系统。小型水电站一般用一个手动补气阀进行手动补气。大型水电站采用自动补气。压缩空气自动补给装置由空气电磁阀、油位信号器和压力信号器等元器件组成。⑤保护设备由安全阀构成,当压力油罐内的压力超过由安全阀弹簧预压缩所设定的推力时,安全阀自动打开排油从而保证了压力油罐内的压力不超过允许的最高值并防止了油泵过载。

(张学中)

youxiao yingli yuanli

有效应力原理 (principle of effective stress)

土力学中一项重要的基本原理,阐明土的力学性



质主要取决于土骨架承受的有效应力。土由土骨架以及充填在孔隙中的水和气所组成。作用在土中单位面积上的法向总应力 σ ，由土骨架承受的有效应力 σ' 和孔隙流体承受的孔隙压力 u 两者所分担。有效应力等于总应力减去孔隙压力，或根据孔隙水对土骨架的浮力以及渗流力进行估算。有效应力原理由 K. 太沙基 (K. Terzaghi) 在 1923 年发现，它为正确确定土的强度、变形和渗透性奠定了基础。

有效应力 可由总应力和孔隙压力计算而得。对于孔隙中全部充满水的饱和土来说，K. 太沙基给出有效应力表达式为

$$\sigma' = \sigma - u \quad (1)$$

对于非饱和土来说，孔隙中既有水又有气，由于毛细管作用，孔隙水和气中的压力并不相同。A. W. 毕肖普 (A. W. Bishop) 提出更一般的有效应力表达式

$$\sigma' = \sigma - [u_a + x(u_a - u_w)] \quad (2)$$

式中 u_a 和 u_w 分别为孔隙气和水压力， x 为系数。孔隙气和水压力虽然已有直接测量办法，但系数 x 尚难精确测定。若应用式 (1) 于饱和度大于 80% 的非饱和土，则不致于产生较大误差。

孔隙压力 孔隙压力有如下两个特点：①孔隙水能承受压应力，不能承受剪应力，因此，作用在土中的剪应力全部由土骨架承担。②孔隙压力沿各个方向都是相同的，而有效应力却可能随着作用方向而变，因此，总应力也是随着作用方向而变的。土体中某一点的有效应力或总应力可用相互垂直的大、中、小主应力来表示。

按产生的原因分，孔隙压力有外载荷变化所引起和受土体表面水头压力所控制两种。图中粘土地基中 p 点在受到外载荷前，它的孔隙压力受地下水位控制，等于 $\rho_w h_1$ ，其中 ρ_w 为水的密度。在地面上受外载荷后，测压管水位升高了 h_2 ，p 点的孔隙压力变成 $\rho_w (h_1 + h_2)$ ，其中的 $\rho_w h_2$ 值是外载荷引起的，它也叫超静水压力，是随着时间而逐渐消散的。时间为零时的孔隙压力最大，称起始孔隙压力。这两种孔隙压力可用如下原则确定：

外载荷在 p 点引起的起始孔隙压力 $\rho_w h_2$ 或 Δu 值，取决于 p 点处的大小主总应力增量 $\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_3$ ，以及土的孔隙压力系数 A 和 B ，并用下式表示

$$\Delta u = B [\Delta\sigma_3 + A (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad (3)$$

土体中的总应力增量是通过应力计算确定的。孔隙压力系数是在试验室测定的，或用弹性理论或弹塑性理论推导确定。饱和土的 $B=1$ 。土的饱和度愈低，密度愈大，则 B 值愈小，甚至接近于零。软土的 A 值大于硬土的 A 值，变化范围为 $0.75 \sim -0.50$ 。

无粘性土的渗透系数较大，即使在快速施加的静力荷重下引起的孔隙压力也将很快消散，因此，在无粘性土中以及在固结完成后的粘性土中的孔隙压力受土体表面水头压力控制。在不发生渗流的状态下，p 点的孔隙压力等于 p 点与地下水位之间的水头压力。

渗透力 孔隙水在土中流动时，水除了对土骨架产生向上的浮力外，还产生沿着水流方向的曳引力。后者叫渗透力，它等于水力比降乘水的密度。根据作用在土骨架上的浮力和渗透力可以确定土中的有效应力。这一确定有效应力的方法与式 (1) 给出相同的结果。

参考书目

黄文熙主编. 土的工程性质. 北京: 水利电力出版社, 1983

(陈愈炯)

yudao

鱼道 (fishway) 为鱼类通过拦河坝(闸)，克服上、下游水位差的一种过鱼水道。它为有回游生殖或育肥习性的鱼类而设。在过鱼水道中设各式隔板或加糙物以控制水流流速。利用鱼类的向流习性，用水流诱引鱼类自行沿水道上溯。它适用于大江大河的中、下游较低水头的水利、水电枢纽，具有通过能力大，对鱼伤害小的优点。鱼道由进口、槽身、出口和辅助供水设施等组成。一般鱼道设在水电站尾水附近，有利于鱼类聚集过坝。鱼道主要有水池式和斜槽式两类。

水池式鱼道 亦称鱼梯，是用一定型式的隔板间隔成多个水池的一条过鱼水道。各水池间具有一定水位差，组成多级池梯。鱼在池中可自下而上逆着水流逐级穿越各池进入水库 (图 1)。

斜槽式鱼道 常见的有丹尼尔 (Denil) 式鱼道，是在一条斜槽的底部和侧壁设置一系列的加糙物，借以减缓槽内水流。鱼在槽中可逆着水流上溯入库 (图 2)。

20 世纪 30 年代后，加拿大、美国在其西部河流建成了一批为鲑、鳟鱼回归产卵的鱼道，如美国邦那维尔 (Bonneville) 坝的鱼道和加拿大赫尔斯门 (Hell's Gate) 鱼道均以规模大、过鱼数量多

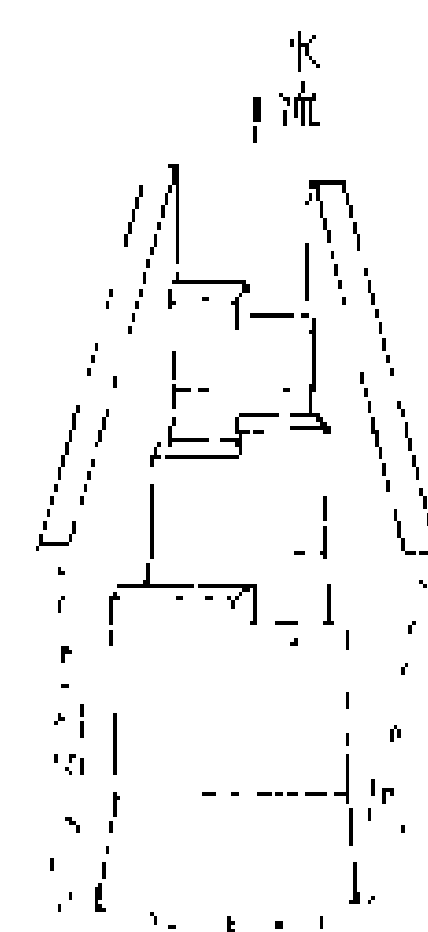


图 1 水池式鱼道透视图



闻名于世。中国于1970年在富春江水电站建成水池式鱼道。在江苏、安徽等省也相继建成一批低水头鱼道。

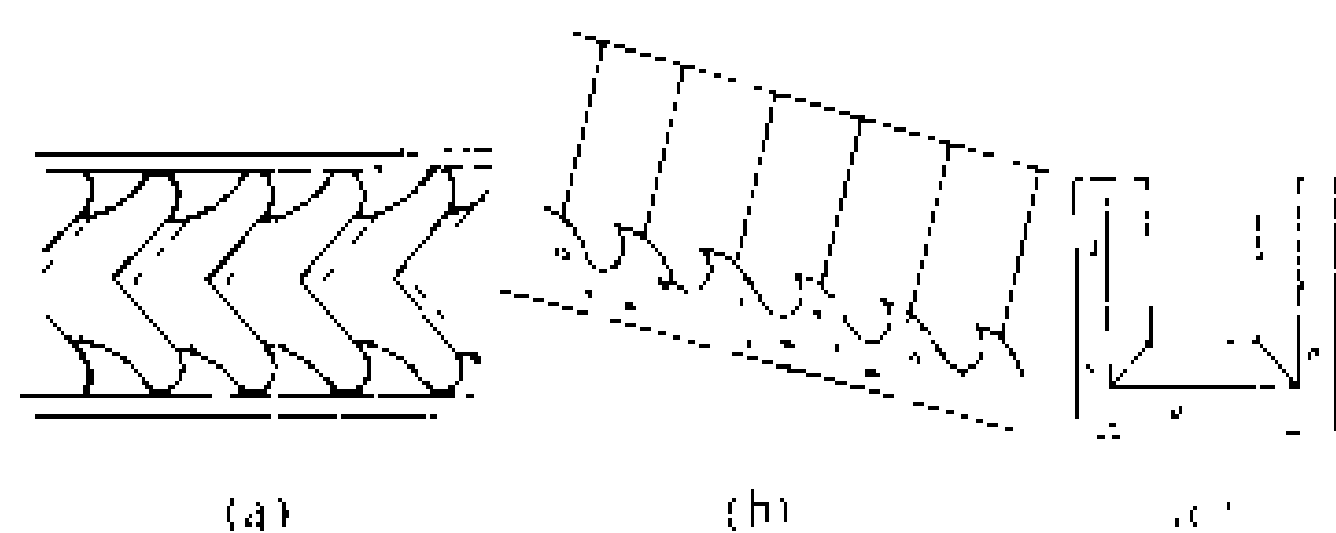


图2 丹尼尔式鱼道

(a) 平面图; (b) 纵剖面图; (c) 横剖面图

(陈惠欣)

2~5。⑤装药密度确定后,从理论上讲,炸药沿预裂孔分布愈均匀愈好,实际上常按每米装药量将药包分段绑扎在导爆索上,由导爆索引爆所有药包。为了克服预裂孔底部较强的夹制力,孔底部应适当增加装药量。⑥为保护保留区的岩体,预裂缝要有一定的超深和超长(见图)。为防止预裂壁面被破坏,离预裂面最近的一排爆破孔,一般还要采用缓冲爆破,即减小孔径,减小抵抗线,减小孔距和减少装药量。

在开挖实践中,大量预裂爆破前,需通过现场试验,确定预裂爆破的各项参数。

(王庭济)

yulie baopo

预裂爆破 (presplit blasting) 开挖岩石时,预先沿设计开挖轮廓线爆出一条裂缝,以防止开挖区以外的岩体或建筑物被破坏的爆破技术。预裂爆破技术在水电工程的露天岩石开挖和地下工程中,得到广泛的应用。开挖时沿设计开挖轮廓线钻一排炮孔,通过控制炮孔孔距、装药量、装药结构等,并且在开挖区炮孔爆破前先行起爆,使沿轮廓形成一条裂缝,将开挖区与保留区隔开。

预裂爆破的作用 ①预裂爆破形成的裂缝,使开挖爆破产生的应力波部分被反射,强度减弱,从而起到减振作用。②开挖区内因爆破产生的裂缝,在向保留区延伸时,被预裂缝隔断,从而可保持保留区岩体的完整。③预裂面的壁面比较平整,超挖量少,可减少混凝土回填量。④采用预裂爆破可一次成形,不留保护层,加快施工进度。

主要特点 ①沿开挖轮廓线钻孔,装入串状药包,先于开挖区的爆破孔起爆。②炮孔孔距根据岩石条件、钻孔直径、炸药特性等确定,一般常取7~12倍钻孔直径,硬岩及孔径较小时取较大值,反之取较小值。③根据岩石的抗压强度、孔距或钻孔直径,通过经验公式计算线装药密度,即单位孔深的装药量。也可用工程类比

yutian guliiao yajiang hunningtu shigong

预填骨料压浆混凝土施工 (prepacked concrete construction)

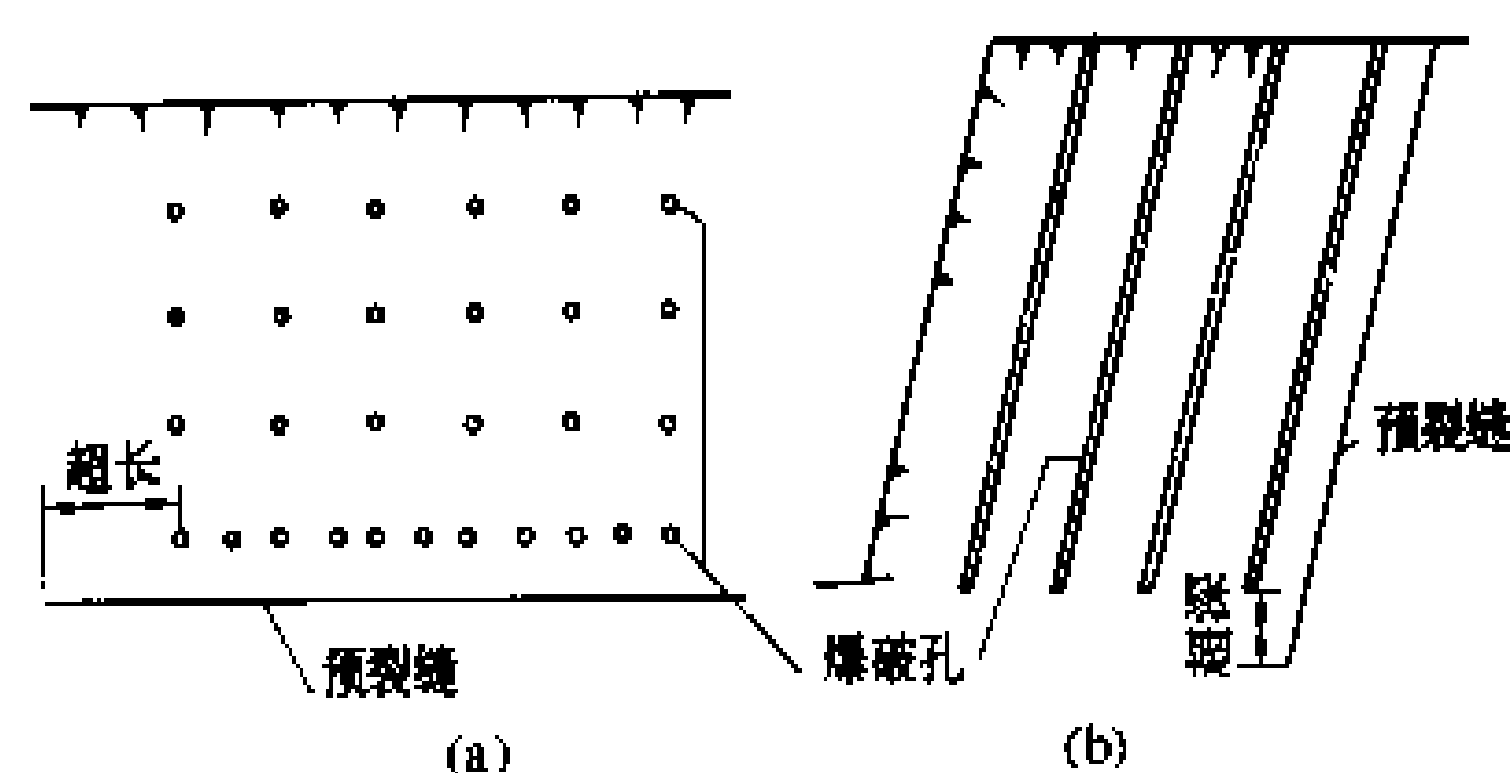
用压力将水泥砂浆压进预先填好粗骨料的模板或空腔内,使形成混凝土的施工工艺。预填骨料压浆混凝土适用于浇筑钢筋稠密、埋件复杂以及其他不易进料和振捣的结构部位,将混凝土浇筑工艺转换为灌浆工艺。为提高混凝土的密实性,还可以与真空作业配合使用。这种工艺也常用于修补加固混凝土和钢筋混凝土结构物以及浇筑水下混凝土。在地下工程施工中,也有采用预填骨料压浆混凝土作为对不良地质的处理措施。

施工前,先将待压浆的部位清理干净。如果使用模板,须有专门设计以保证不漏浆和压浆时不发生过大变形。填入的粗骨料,一般最小粒径不小于2cm,填放密实,尽量减少孔隙率。配制砂浆需采用细砂,需将粒径2.5mm以上的部分筛除。砂浆可掺入掺和料和外加剂,使具有良好的流动性,以利于压入骨料的孔隙中。

压浆时,可采用砂浆泵,也可以利用高差,靠浆液自重形成压力,压浆的压力可采用200~500 kPa。压浆程序要由下而上,逐渐上升,并不能间断。浆体上升速度以50~100 cm/h为宜。压浆部位要事先埋设观测管、排气管,以检查压浆进行情况。

预填骨料压浆混凝土施工不需要大型设备。由于粗骨料互相接触,形成受力骨架,因而制成的混凝土干缩较小。用于修补加固混凝土结构物时,如采用加有膨胀剂的砂浆,可使新旧混凝土粘结较好。在水下混凝土使用时,因浆液由下往上逐步压送,可将预填骨料孔隙中的水置换为比重较大的砂浆,使形成的混凝土比较密实。

(王庭济)



预裂爆破示意图

(a) 平面; (b) 横剖面

法采用经验数据。④采用药卷直径(d)小于钻孔直径(D)的不偶合装药结构,不偶合系数(D/d)一般取

yuxiang chuli

预想出力 (expected output; available out-

put) 见水电站设计水头。

yuyingli hunningtu shigong

预应力混凝土施工 (prestressed concrete construction) 通过张拉钢筋,使钢筋混凝土结构在承受外部荷载之前,受拉区的混凝土预先受到一定压应力的施工工艺。预应力可提高混凝土的抗拉能力,提高结构的刚度。在水电工程中,预应力混凝土常用于坝上交通桥梁、厂房天车梁、受力较大的闸墩等,也可用于加固坝体。

基本概念 混凝土的抗拉强度相对较低,只有抗压强度的 $1/10 \sim 1/13$,为此,通常在受拉区配置钢筋,成为钢筋混凝土结构。在承受荷载以后,允许受拉区的混凝土有一些细微裂缝,但有一定限度。一般在混凝土开裂已达到允许限度时,钢筋的抗拉能力还没有充分发挥。为充分发挥钢筋的抗拉和混凝土的抗压能力,事先将钢筋张拉到一定应力值,待混凝土达到规定的强度后,放松被张拉的钢筋。这时钢筋产生弹性回缩,由于被混凝土锚固,其回缩力传给混凝土,使受拉区的混凝土预先受到一定压应力。这样,在结构物受到外部荷载作用时,其受拉区的拉应力首先要抵消预压应力。这就提高了混凝土结构的抗裂能力,增加了结构的刚度,可节约钢筋和水泥。用于预应力混凝土的钢筋,常采用高强度钢筋、钢丝或钢丝束。

施工方法 按照施加预应力的时间,预应力混凝土施工分先张法和后张法。①先张法是在浇筑混凝土以前把钢筋按要求张拉到规定的控制应力值,用夹具

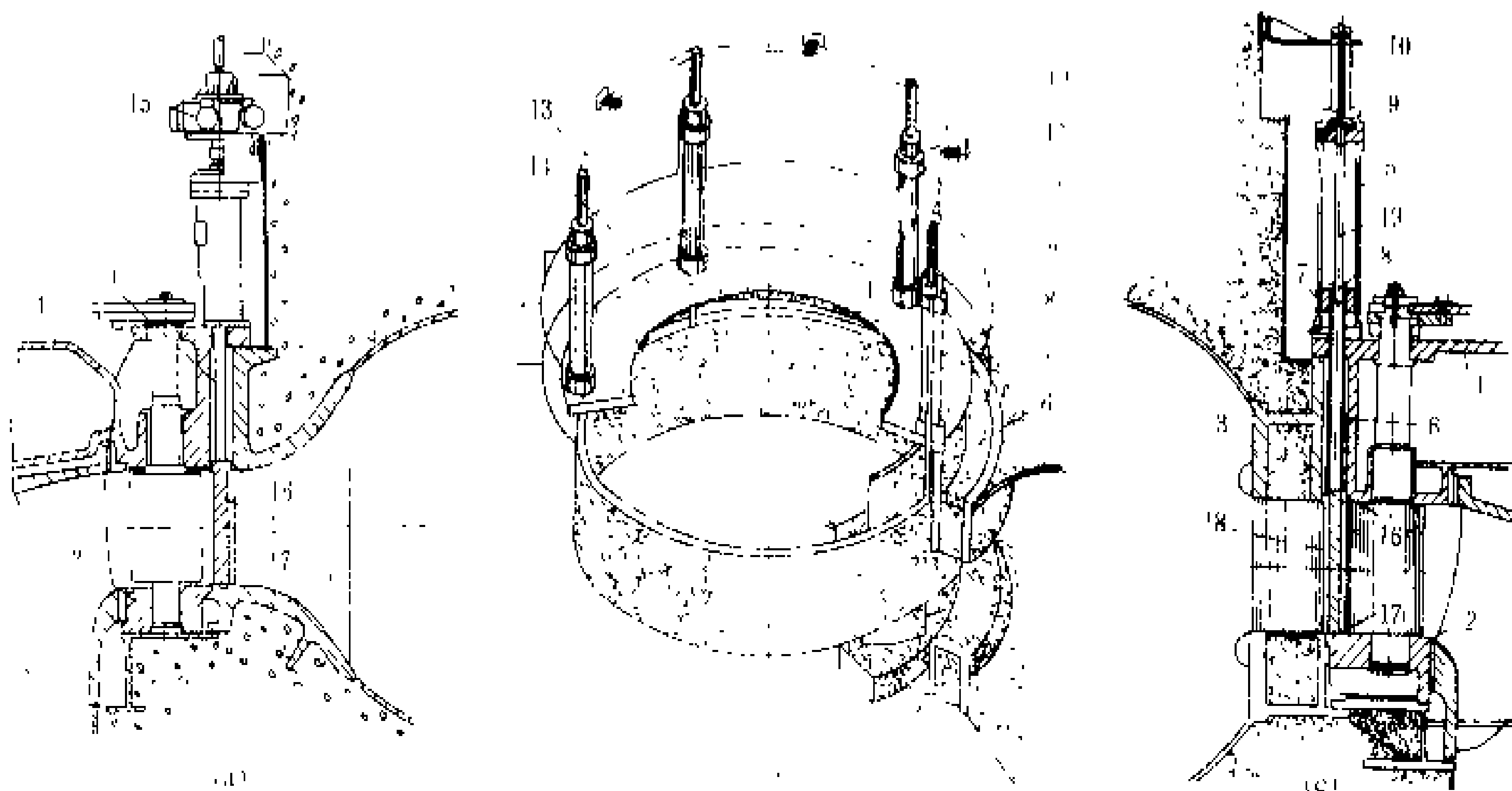
将其临时固定在台座或钢模上,然后浇筑混凝土,直到混凝土达到一定强度后,再将张拉的钢筋放松。②后张法是在浇筑混凝土以后再张拉钢筋,一般在配置预应力钢筋的部位预先留出孔道,等混凝土达到规定强度后,再将钢筋穿进去,张拉到规定的控制应力值,用锚具将其两端固定,再在预留孔道内灌入水泥浆或水泥砂浆,最后放松钢筋的张拉力。张拉的方法,一般分机械张拉、电热张拉和化学张拉。①机械张拉采用千斤顶、卷扬机等机械设备拉伸钢筋。②电热张拉是在钢筋上通电使之热胀伸长。③化学张拉是用膨胀水泥配制混凝土,混凝土在硬化过程中体积膨胀,迫使钢筋伸长。这种靠混凝土自身膨胀而产生预应力,通常叫自应力,多用于环形构件如水泥压力管等。

(王庭济)

yuantongfa

圆筒阀 (ring gate; cylindrical gate) 设在水轮机固定导水叶和活动导水叶之间的圆筒形闸阀。当机组发生飞逸或导水机构失灵不能关闭等事故时,可动水关闭圆筒阀停机;在正常停机导水叶关闭后,可静水关闭圆筒阀,以免导水叶长期受高速水流间隙汽蚀和泥沙磨损的破坏,并节省了进水管的放空和充水时间,减少水量损失和开停机时间。因圆筒阀一周水力平衡,故可动水开启。一般不能靠圆筒阀关闭检修水轮机。圆筒阀具有尺寸小,重量轻的特点。圆筒阀及其驱动机构见图。

活门 活门呈圆筒形,其挡水高度等于导水叶高



圆筒阀及其驱动机构图

(a) 油马达圆筒阀; (b) 圆筒阀及其驱动机构; (c) 直缸接力器圆筒阀

1—活门; 2—底环; 3—座环; 4—顶盖; 5—直缸接力器; 6—操作杆; 7—活塞; 8—行星滚子螺母; 9—止推轴承; 10—链轮; 11—拉紧链轮; 12—链条; 13—上油管; 14—下油管; 15—油马达; 16—上密封; 17—下密封; 18—青铜导轨; 19—中心螺杆



度,关闭时圆筒下表面紧压在底环表面密封,上部和座环或顶盖密封,上下密封采用硬度很高的橡胶条,开启时整个圆筒升到座环和顶盖之间的环形空间内,圆筒下表面和上抗磨板齐平,不影响水流,水力损失几乎为零。活门可用铸钢或厚钢板卷制后加工而成,根据运输条件决定是否分瓣,分瓣的活门运到工地后焊接成形磨光内外圆,活门利用镶有青铜条的固定导水叶尾部作导轨,活门上易磨蚀部位焊有不锈钢。

驱动方式 圆筒形活门上部一周均布4~6根具有一定韧性的高强度不锈钢操作杆,通过密封装置伸出顶盖和各自的操作机构连接,在操作机构顶部有链轮,用链条将4~6个操作机构互相啮合,同步转动,见图(b),以保证整个活门上下平移。操作机构有油马达操作和直缸接力器操作两种型式:①油马达操作机构的每个油马达带动一个螺母,螺母的回转一面使带螺纹的操作杆上下移动带动活门上下,一面又带动同步链轮链条运动,保证几个油马达同步回转,这种圆筒阀的动作不依赖水力,全关时活门外圆和座环密封,上腔无水压,活门靠带螺纹的操作杆自锁,但油马达驱动油压高,消耗油量大,见图(a)。②直缸接力器的活塞直接带动活门上下,活塞本身又是一个高精度螺母,通过内部的行星螺杆将活塞的直线运动转变为中心螺杆的回转运动,中心螺杆上端的链轮通过同步链条使各中心螺杆同步回转,从而保证各活塞同步移动,这种圆筒阀活门不能自锁,全开时接力器开腔要始终保持油压,油压降低活门有自行下落的危险,关阀时活门上下水压差和自重使它有自关闭趋势,全关时活门内圆和顶盖密封,上腔的水压把活门紧压在底环密封橡胶条上。直缸接力器驱动油压较低,耗油量小,见图(c)。

(吴次光)

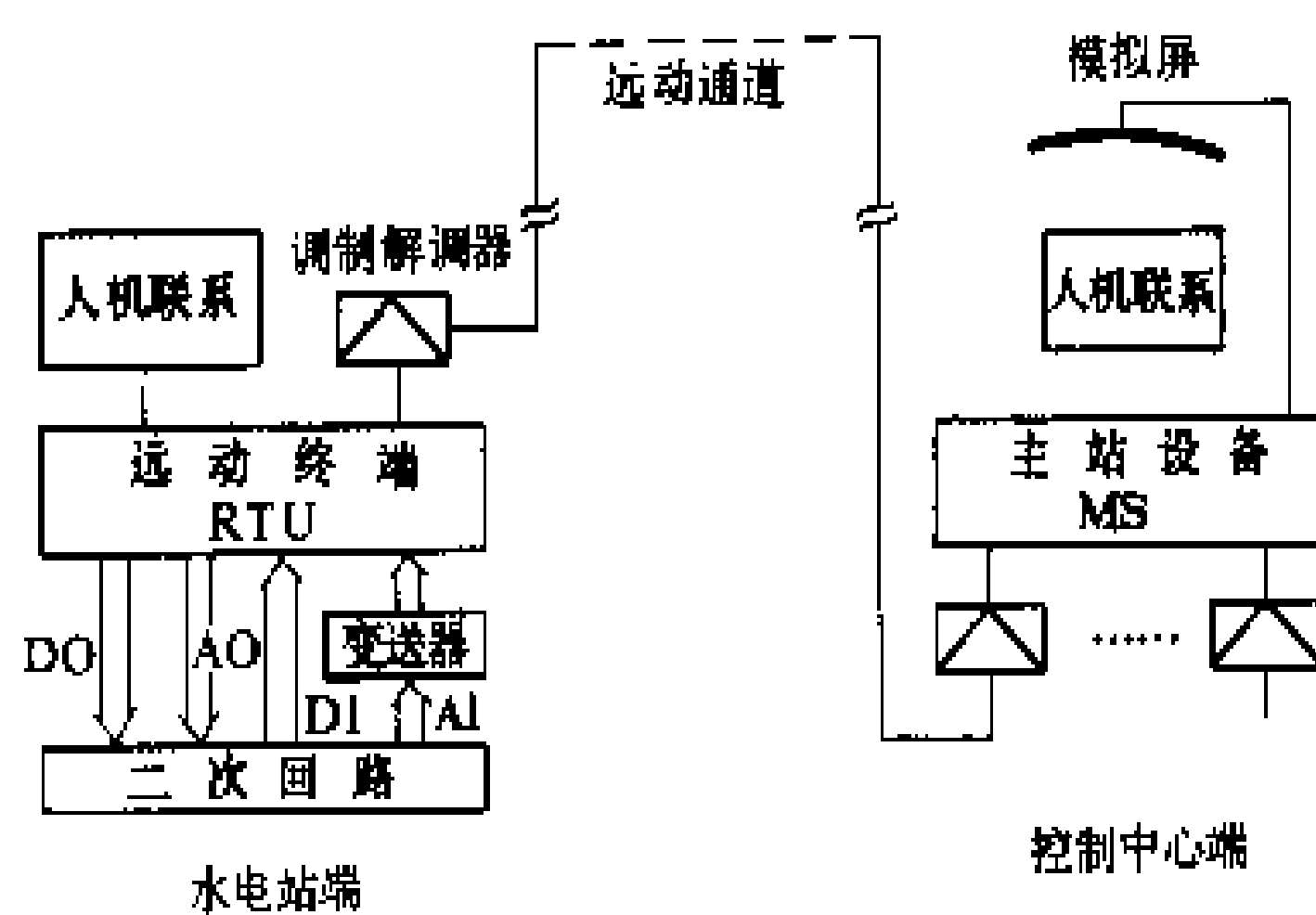
yuandong

远动 (telecontrol) 利用通信技术传输实时信息对远方设备进行监视和控制的技术。水电站远动的主要任务是收集水电站生产过程的实时参数和状态传送给远方的控制中心,同时把控制中心的操作命令传送给水电站,即完成遥测、遥信、遥控、遥调四项功能。

远动系统的构成 分水电站和控制中心两端,中间通过电力线载波、微波、无线电或光纤等远动通道进行通信联系。微机远动系统的构成如图所示。

水电站一端的远动设备称厂站端,也称远动终端(remote terminal unit, RTU);控制中心通常指调度所或梯级调度所,该侧的远动设备称调度端,也称主站(master station, MS)。主站设备可以与一个或多个水电站、火电厂或变电所通信。人机联系设备指屏幕显示

器与打印机,可向调度员或值班人员提供主接线图和表报等实时信息。控制中心还设有调度模拟屏与主站设备接口,显示水电站和电力系统运行的实时参数和状态。



远动系统构成示意图

AI—模拟量输入; AO—模拟量输出; DI—开关量输入;
DO—开关量输出

遥测 遥测是采集水电站的电压、有功功率、无功功率、上(下)游水位等模拟量,这些模拟量输入(AI)经变送器变换为弱信号再送到RTU。RTU由微机构成,其功能是将各模拟输入量经过模数变换转换成数字量,然后再作编码处理,变为一串脉冲信号经调制解调器调制为远传信号,送入远动通道传到控制中心后,再经调制解调器解调为一串脉冲信号,接入主站设备。由计算机构成的主站设备将接收到的脉冲信号还原为各个相应的测量量存于存储器内,经加工送调度模拟屏和屏幕显示器。主站计算机若检测到这些测量量越过正常允许范围,使用闪光或变换颜色表示,并用音响告警,提醒调度人员注意。RTU具有上述类似的人机联系功能,向现地值班人员提供水电站的实时情况。

遥信 遥信是采集水电站的断路器位置信号、分析系统事故所需的主要继电保护及自动装置动作信号、机组运行状态信号以及总事故信号等,这些统称为开关量输入(DI),开关量输入经隔离处理接到RTU,经远动通道传送到主站设备。若发生跳闸等变位信号则在屏幕显示器和模拟屏上闪光,并用音响告警,提醒调度员。

遥控 遥控是实现调度员向水电站下达开停机或操作断路器和需由控制中心决定投切的自动装置等的命令。通过键盘或按钮把命令输入主站计算机,经编码等处理后经远动通道传送到RTU,然后动作相应继电器,通过开关量输出(DO)去控制有关机组的开停、断路器或自动装置的投切。

遥调 遥调是实现调度员下达的调节命令。调节的参数输入主站设备,再送到RTU,然后变换为模拟

量输出(AO),通过调节器完成机组的有功和无功功率的调节。当水电站设有有功和无功成组调节装置或计算机监控系统时,则可调节全电站的有功和无功功率。

运动简史 运动技术发展按其使用元器件经历了电子管和继电器、半导体元件、集成电路、微机运动设备四个阶段。今后将采用分布式微机技术和工作站技术并向智能化方向发展。

(叶世勳)

yuanfang tiaozha zhuangzhi

远方跳闸装置 (teletripping device) 将跳闸命令传送到线路对端的专用远方控制装置。在高压线路一端的继电保护动作而需对端断路器跳闸时,则利用这种装置实现远方跳闸,其作用有:①加速切除全线路故障。远方跳闸装置与线路保护第一段配合,当第一段保护动作,除无时限跳本端断路器外,同时将跳闸命令传至线路对端,使对端断路器亦无时限地跳开。②远方切除故障变压器。在变压器与输电线路之间不装设断路器的变压器-线路组接线中,当变压器故障时,保护装置除跳开变压器低压侧断路器外,并利用本装置使对端断路器跳开。③远方切除故障并联电抗器。当并联电抗器直接连接在线路断路器外侧时,电抗器故障,保护装置除跳线路本端断路器外,并利用本装置跳开对端断路器。④线路断路器失灵的后备。当保护装置动作而出线断路器失灵时,利用本装置将对端断路器跳开。

此外,远方跳闸装置还可在电力系统稳定控制中用于远方切除发电机组、远方投入电气制动装置和远方切除负荷等。

远方跳闸装置是由收、发信设备及连接通道组成。其构成方式有两大类:①在专用信号线上传送直流信号。其原理比较简单,但需专用信号线,实际使用受到一定限制。②利用微波或电力线载波通道传送跳闸信号。在发送端设发信设备,在接收端设受信设备。装置通常采用频率偏移原理(见图)。正常工作时,为了监

时,将发信频率从 f_1 偏移至 f_2 ,收信机收不到 f_1 信号,即将出口开放一短时间间隔,在这一间隔内若收到 f_2 信号,则“与”门即输出控制指令。由于 f_1 与 f_2 频差很小,故 f_1 与 f_2 属于同一频道范围。这种方式具有较高的抗干扰性和动作的可靠性。此外,还有采用脉冲编码或数字式等其他方式,但作为不与其他功能合用的专用功能装置,用频率偏移原理是比较简单的。

(梁见诚)

Yunfeng Shuidianzhan

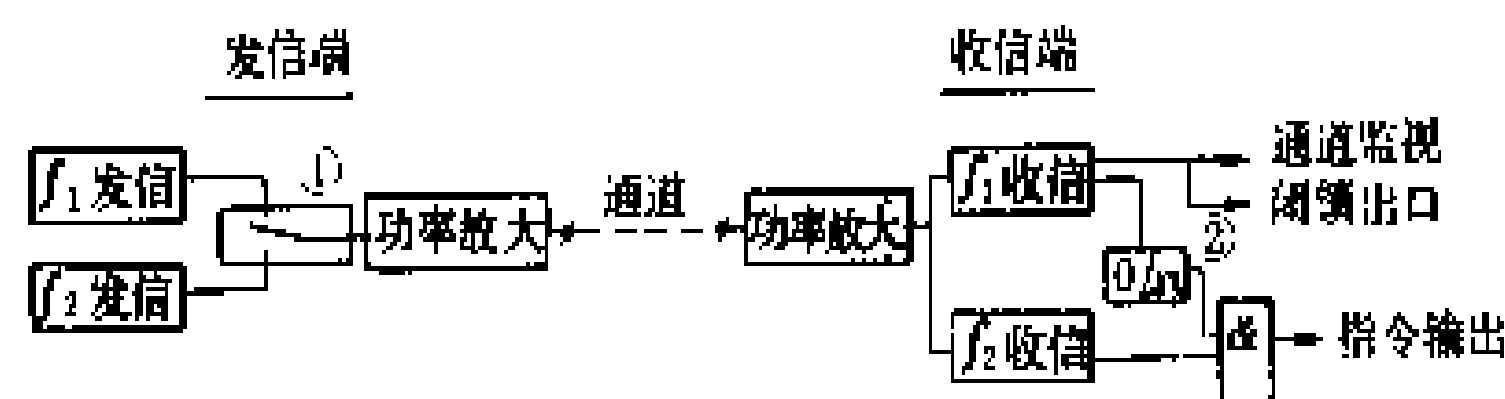
云峰水电站 (Yunfeng Hydropower Station) 位于中朝界河鸭绿江干流中游,中国吉林省集安县和朝鲜慈江道满浦郡境内。电站为中朝两国共有,由中方负责运行管理。装机容量 400 MW,保证出力 150 MW,多年平均年发电量 17.5 亿 kW·h。用 4 回 220 kV 输电线路向中、朝两国供电。大坝为混凝土宽缝重力坝,最大坝高 113.75 m。云峰水电站是鸭绿江梯级水电站的第一级,其下游有渭源、水丰、太平湾等梯级水电站。工程于 1959 年 10 月开工,1965 年 9 月第一台机组投产发电,1967 年 4 月 4 台机组全部投产。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 17572 km²。多年平均年径流量 87.5 亿 m³。水库总库容 39.11 亿 m³,具有不完全多年调节性能。大坝的设计洪水标准为千年一遇洪水,相应洪水流量 21100 m³/s,相应洪水位 319.26 m。校核洪水标准为万年一遇洪水,相应洪水流量 27100 m³/s,相应洪水位 320.64 m。水库正常蓄水位 318.75 m,相应库容 37.08 亿 m³。死水位 281.75 m,相应库容 10.46 亿 m³。调节库容 26.62 亿 m³。汛期防洪限制水位 318.75 m,防洪库容 2.03 亿 m³。电站设计水头 89 m,最大水头 113.5 m,最小水头 68.6 m。

枢纽布置 枢纽主要由大坝挡水段、中孔段、溢流段以及电站和引水建筑物等组成,见图。

大坝为混凝土宽缝重力坝,坝基主要是火成岩、板岩、玢岩和花岗斑岩等。坝顶高程为 321.75 m,防浪墙顶高程为 322.95 m。坝顶全长 828 m。溢流坝段长 315 m,设有 21 个溢流孔,孔高 7.5 m,宽 11 m。溢流堰顶高程 306.25 m,挑流方式消能,最大泄流能力为 21900 m³/s。设有平面定轮闸门,由门机启闭。其右侧为中孔坝段,设 4 个中孔,进口底坎高程 251.75 m,孔身为圆形,直径 5.3 m。出口设弧形闸门,尺寸为 4.25 m×4.25 m,由液压启闭机启闭。最大泄流能力为 2304 m³/s。

发电厂房为岸边引水式,在河流右岸中国一侧。由 2 条隧洞自水库引水,洞径 8.6 m,洞长分别为 775 m



远方跳闸装置原理框图

①—移频控制; ②— $f_1=0$ 时发出开放短脉冲

视收、发信设备及通道的完好性,由发信机不断发送一连续的、频率为 f_1 的高频监视信号,收信机收到 f_1 信号后,将控制指令出口闭锁,从而大大减少由于高频干扰而引起误动的可能;当发信端要发送远方控制指令



和 759.3 m，钢筋混凝土衬砌。进水口底坎高程为 265.27m。调压井为差动式。地面发电厂房，长 105 m，

机械分为陆上运输机械、水上运输机械和空中运输机械。水电工程施工中以陆上运输机械为主，分为无轨运输机械、有轨运输机械、连续运输机械等三类。

无轨运输机械 包括各种载重汽车、自卸汽车、拖车、工程专用汽车等。

(1)载重汽车。最通常使用运载货物的汽车，其载重量一般为 2~18 t，2.5 t 以下为轻型车。

(2)自卸汽车。依靠液压油缸举升的顶推作用，将金属车箱向一侧举起，把所载物料自行倾卸的汽车。它具有车身坚固，机动性与越野性能好，爬坡能力强，卸载迅速等特点，在水电工程施工中广泛采用。

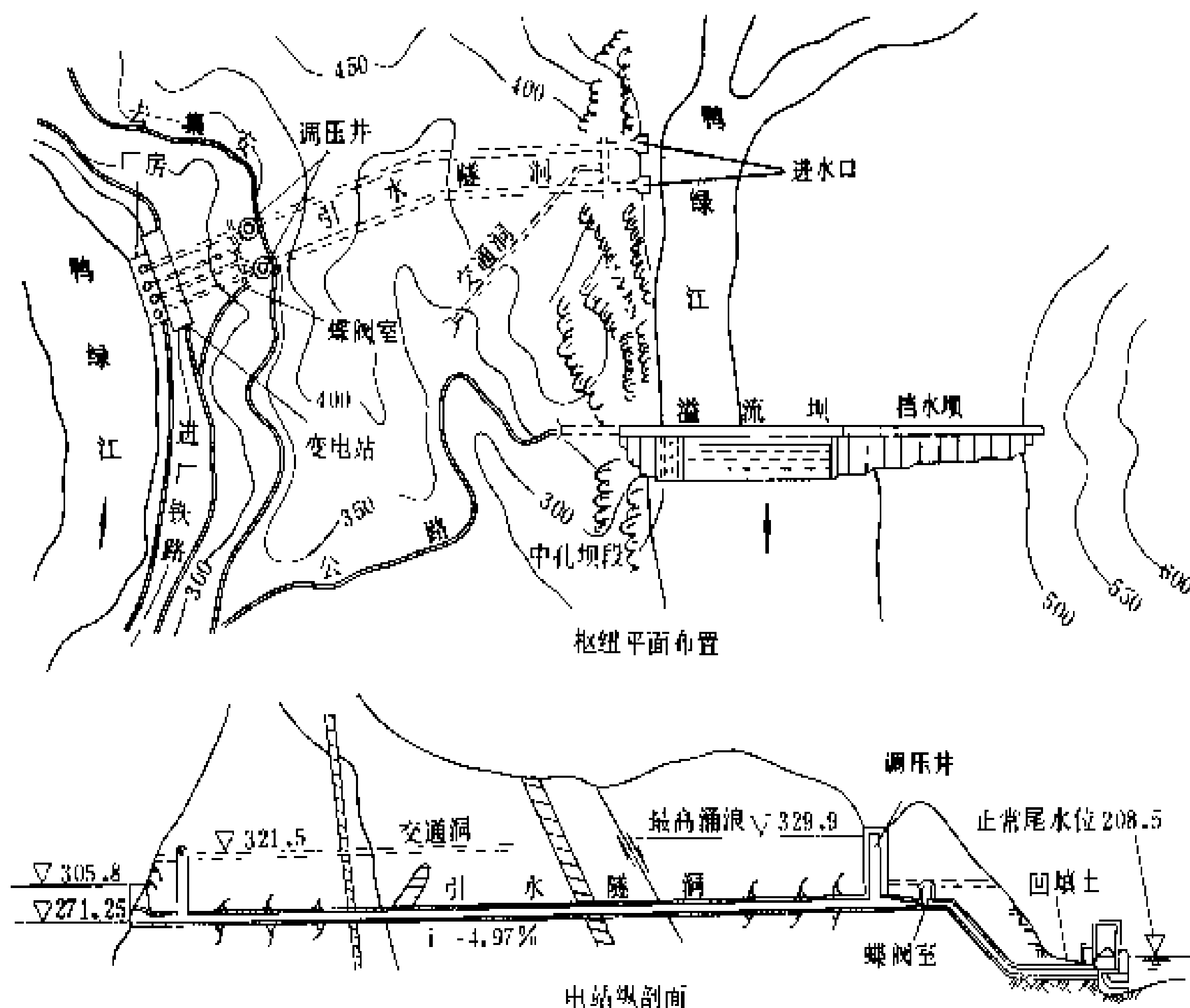
自卸汽车按车箱倾卸方式分，有后卸式、侧卸式、三面倾卸式及底卸式

四种。按用途划分，有普通型与矿山型二种。按载重量划分，小于 2 t 为轻型车，2.5~8 t 为中型车，大于 10 t 或 15 t 为重型车，20 t 以上为超重型车。

(3)拖车。本身无动力装置，需用专用牵引车（又称拖车头）或载重汽车、拖拉机等牵引设备拖动的公路运输车辆，水工地常用的拖车载重量为 40~200 t。主要用于运输大型工程机械及机电设备，也可用于桥梁桁架、预制混凝土构件等大型结构件或大宗材料的运输。拖车按结构与牵引车的连接型式大致可分为全挂式拖车与半挂式拖车二种。全挂车具有独立的车身底盘，货重和挂车自重都由自身的轮胎传给路面。全挂车按照轮轴数目可分为单轴、双轴和多轴三种。半挂车的前部支承与拖车头的鞍形装置相连接，其自重和货重的一部分压载在拖车头上，一部分由自身的轮胎传给路面，它也有单轴、双轴和多轴之分。

(4)工程专用汽车。在通用载重汽车的底盘上，装置特种设备，以适应专门用途的汽车。常用的工程专用汽车主要有散装水泥车、运油加油车、洒水运水车、混凝土搅拌车、混凝土泵车等。

散装水泥车是专为运输散装水泥和粉煤灰而设计改装的专用汽车。它的装灰金属罐体有立式和卧式二种，以卧式居多。单车载重 4.5~18 t，半挂式载重可达 26 t。按其卸料方式的不同，可分为倾卸式、机械卸



云峰水电站枢纽平面布置图

宽 31 m，高 55.06 m。厂房内安装 4 台单机容量 100 MW 的水轮发电机组。其中，3 台水轮机转轮直径为 4.1 m，1 台为 3.8 m。1 号和 3 号发电机为 50 Hz，向中国东北电网送电。2 号和 4 号发电机为 60 Hz，向朝鲜送电。厂房内安装两台 1250 kV·A 的变频机，以便中朝双方交换电力。变电站沿山坡作台阶式布置，有主变压器 4 台，每台容量 120 MV·A。

坝顶设 4 台起重机，起吊木材过坝，年运输能力 60 万~100 万 m³。

运行效益 自 1965 年发电至 1988 年底，累计发电 323.4 亿 kW·h，向朝鲜送电 181 亿 kW·h。在防洪方面，最大一次洪水发生在 1972 年 8 月，入库洪峰 5510 m³/s，最大下泄流量 1900 m³/s，削减洪峰 65.5%。

设计和施工单位 大坝由朝鲜重工业委员会第一设计所设计，朝鲜第一建设事业所施工。发电厂房及引水建筑物由中国水利电力部东北勘测设计院设计，云峰水电工程局施工。

(谷云青)

yunshu jixie

运输机械 (transportation machine) 用于输送料物或人员的机械设备。按其运行条件，运输机



料式和压气卸料式三种。前二种只能将水泥卸入停车面以下或稍高于停车面的受料漏斗或料仓内，后一种则可将水泥送到一定距离和一定高度的水泥库内，是采用最多的卸料方式。

有轨运输机械 包括蒸汽机车、内燃机车、电气机车、蓄电池机车等牵引机车及各种有轨运输车辆。

有轨运输有标准轨距铁路与窄轨铁路二种，中国标准轨为 1435 mm 轨距，窄轨有 1000 mm、762 mm、600 mm 等几种轨距。

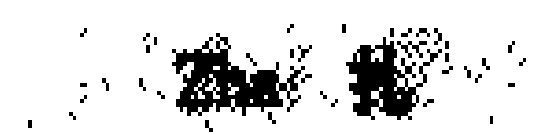
标准轨运输车辆有平车、敞车、棚车、自卸矿石车、散装水泥车及罐车等，还有专门运输重大件的特种运输车。其中自卸矿石车是一种具有压气卸车装置的车辆，车辆倾翻角一般为 45°。在水电工程中常用来运输

砂石料等建筑材料，一般载重量为 60 t。

窄轨运输车辆有平车、固定车箱式矿车、V 型及 U 型翻转式矿车、曲轨侧卸式矿车、双向侧卸式矿车及梭式矿车等多种。梭式矿车由机车牵引，其槽形箱体内存有刮板输送机，它可将首部接受的渣石逐步推移到尾部，直至装满整节箱体，运至卸料地点，再次开动刮板机，箱体内存的渣石可全部从尾部卸出，是中小型隧洞掘进采用有轨运输的一种高效出渣设备。

连续运输机械 包括各种类型的带式输送机、螺旋输送机、斗式提升机、架空索道和管道气力输送设备等，在水电工程建设中广泛应用。

（龚贵焘）

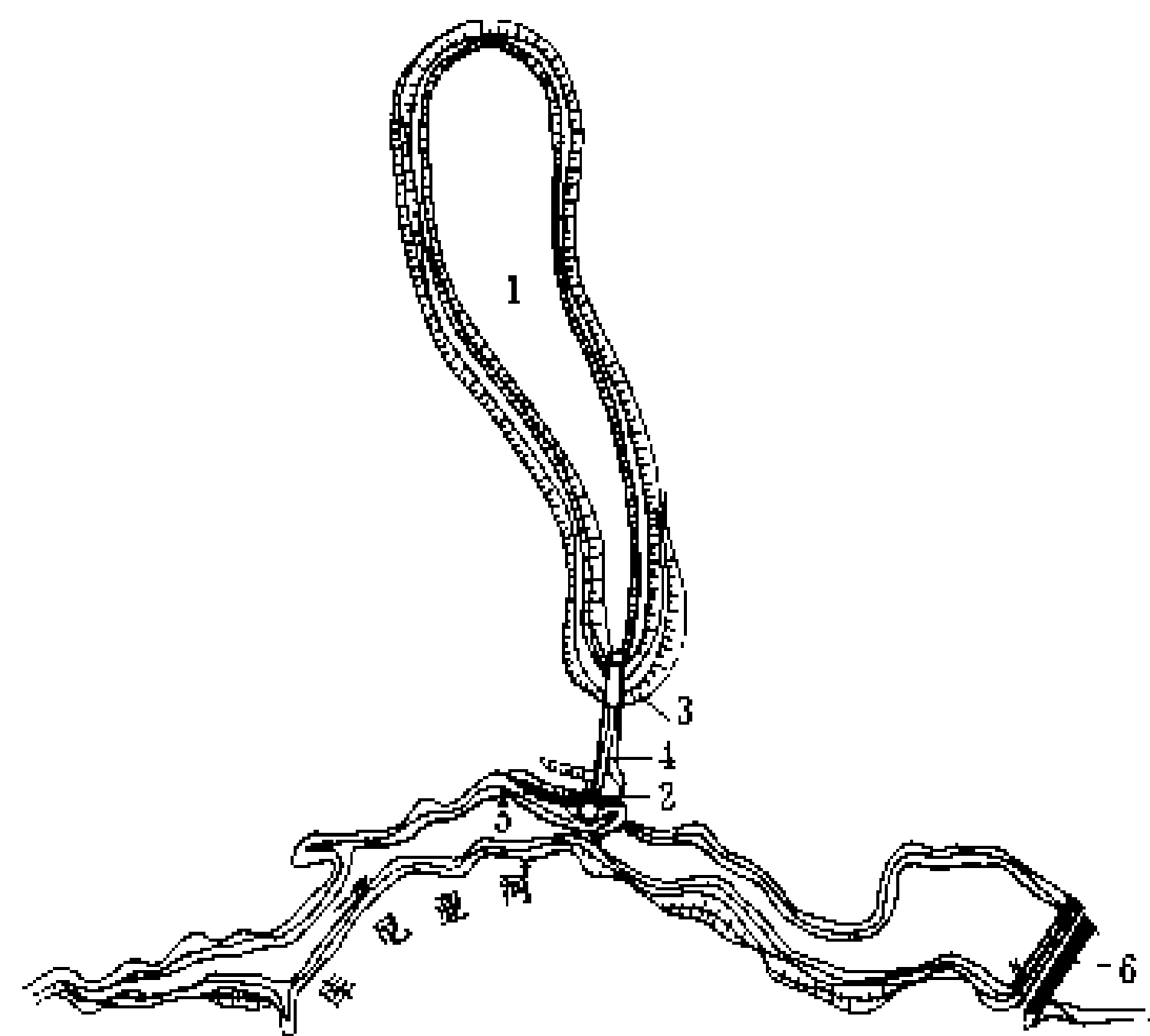


Z

Zhage'ersike Choushui Xu'neng Dianzhan

扎戈尔斯克抽水蓄能电站 (Zagorsk Pumped Storage Power Station)

纯抽水蓄能电站,位于莫斯科市西北 70 km。发电总容量 1200 MW,平均年发电量 12.0 亿 kW·h,抽水总容量 1320 MW,抽水年用电量 16.4 亿 kW·h,总效率 73.2%。用长 15 km 的 500 kV 超高压输电线路接入莫斯科地区电力系统。每昼夜发电工况运行 5.6 h,抽水工况运行 8 h。电站投入后,代替原先的调峰火电机组,每年可节约标准煤 40 万 t。电站于 1975 年开工,1988 年开始发电。



扎戈尔斯克抽水蓄能电站平面布置图

1—上水库; 2—厂房; 3 进水口; 4 压力管道; 5 下水库; 6 库尼亚河下水库坝

上水库和下水库 上水库修建在库尼亚 (Куйбышев) 河岸边的高台地上。台地由白垩系未胶结的砂层、粘土层和砂质粘土层组成。利用半挖半填方式,修筑围堤形成上水库,围堤长 9000 m,最高 35 m。水库面积 2.7 km²,最高蓄水位 165.5 m,相应库容 2970 万 m³,最低蓄水位 156.5 m,调节库容 2200 万 m³,工作深度 9 m。

下水库建在库尼亚河上,壅高水位 22 m。电站平面布置见图。坝址多年平均流量 1.4 m³/s,多年平均年径流量 4415 万 m³,可以满足电站运行的需要。水库

面积 3.3 km²,最高蓄水位 62.5 m,相应库容 3320 万 m³。最低蓄水位 52.5 m,调节库容 2200 万 m³,工作深度 10 m。

进水口布置在上水库的东岸,其后设 6 条长 730 m 的钢筋混凝土压力管道,管道内径 7.5 m。

地面厂房 内装 6 台单机容量 200 MW 的立轴单级可逆式混流机组。

水泵水轮机转轮直径 6.3 m。发电工况时,转速 150 r/min,额定水头 100 m,最大水头 113 m,额定容量 205 MW。水泵工况时,额定扬程 96 m,相应抽水量 170 m³/s,额定输入功率 217 MW,最大扬程 115 m。发电电动机为伞式,额定电压 15.75 kV,额定容量 236 MW。采用晶闸管励磁。发电工况的效率为 0.85,抽水工况的效率为 0.95。

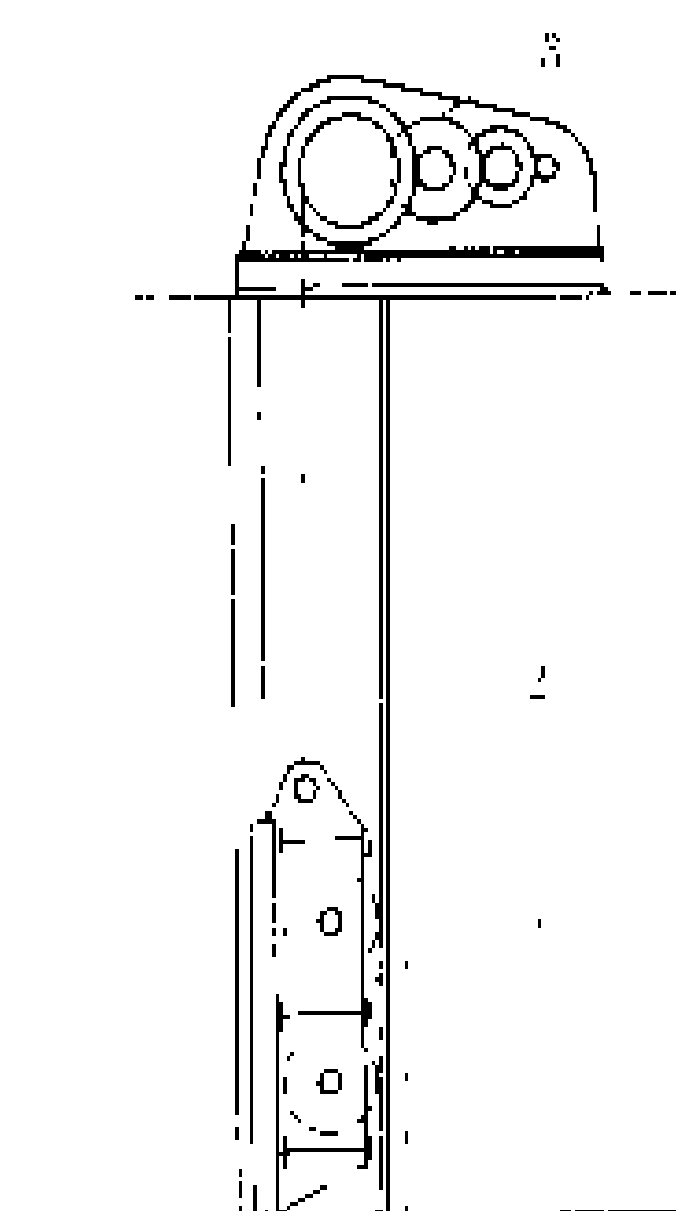
工程量 土方开挖 1934 万 m³,土方填筑 2068.7 万 m³,石方填筑 87 万 m³,混凝土浇筑 70 万 m³,金属结构安装 12760 t。

(熊思政)

zhamen

闸门 (gate) 设置在水工建筑物过水孔口上,用以控制水流的设备。它具有在动水中或在静水中进行启闭操作和调节流量的功能并为其上游或下游提供检修条件。

组成 闸门主要由活动部分、埋设部分和启闭机械组成。活动部分一般由面板和梁系组成,称门叶结构。埋设部分系埋固在闸门孔口周围的构件。其中,门



平面闸门的三大组成部分

1—活动部分; 2—埋设部分; 3 启闭机械

楣、底槛、止水座板等构件在孔口周围形成一个与门叶结构上的止水装置相配合的止水面,借助水压力的作用,将门叶结构压紧在这个止水面上,达到闸门止水的目的。闸门的止水装置是保证闸门可靠运行的重要部件,对高水头闸门更为重要。止水装置设于闸门门叶上游面的称上游面止水,设在下游面的称下游面止水。埋设的支承轨道等构件将门叶结构所承受的载荷传递给水工建筑物。启闭机械系控制活动部分位置的操作机构。图中所示为平面闸门的三大部分。

类型 按在库水位下设置深度分表孔、中孔和深



(底)孔闸门。闸门门顶露出水面的称露顶式闸门,所有潜没于水下的闸门统称潜孔式闸门。据闸门承担的任务和操作运用特点,可分为工作闸门、事故闸门和检修闸门等。依闸门挡水面体型和构造特征分,有平面闸门、弧形闸门、扇形闸门、圆筒闸门及人字闸门等。按制作闸门使用的材料不同,又有钢闸门、木闸门、铸造闸门及钢筋混凝土闸门等。按闸门所在水工建筑物的类型,有泄水建筑物的闸门、水电站进水口的闸门、通航建筑物的闸门以及施工导流闸门等。

泄水建筑物的闸门 在泄水建筑物进口一般设置能在动水下启闭的泄水工作闸门,有时要求闸门能局部开启。常用的门型有平面闸门和弧形闸门等。为了在工作闸门及其下游水道发生事故时能截断水流,并为其提供维护检修条件,通常需在工作闸门上游设置事故闸门或事故检修闸门。事故闸门需在动水中能关闭孔口,截断水流,待事故消除后,在静水中开通孔口。如果泄洪工作闸门和事故闸门的上游有需作定期检修的较长水道时,宜在其进口设置检修闸门。检修闸门只能在静水中启闭。

水电站进水口的闸门 在水电站进水口一般需设置事故闸门。为了当水轮机导水叶发生事故时能紧急关闭进水口,需设置快速闸门。快速闸门是具有在限定时间内快速关闭孔口性能的事故闸门。为事故闸门及其下游段提供检修条件,通常在事故闸门上游设置检修闸门。

通航建筑物的闸门 在船闸闸首经常采用人字闸门、横拉闸门、一字闸门、平面闸门及双扉平面闸门等,这些闸门通常在静水条件下启闭。在船闸输水廊道中设置的充、泄水闸门,需在上、下游淹没水深的动水下启门,在静水下关门,其门型多采用直升式平面闸门或反向弧形闸门等。

施工导流闸门 供截堵导流孔口用,一般为平面闸门,要求在一定水头下动水关闭孔口。

(沈德民)

zhayao

炸药 (explosive) 在一定外界能量(加热、摩擦、撞击)作用下,能由其本身的能量使其物态瞬间改变,同时释放大量热能和产生大量气体的物质。炸药爆炸时,对周围介质做功并伴随声、光等效应。炸药种类繁多,中国水电工程中最常用的有:2号岩石硝铵炸药,铵油炸药、胶质炸药、梯恩梯等。此类炸药安定性好,在外界条件影响下性能变化不大,在常温下能长期储存,统称谓安全炸药。

炸药按用途分为起爆药、猛性炸药和发射药。

起爆药 主要用于激发次级炸药的爆轰(见导爆

索),常作为装填工业雷管的正起爆药,敏感度高,从燃烧到爆轰的时间极短,起爆冲能大,化学安定性好,利于加工装填。最常用的起爆药有雷汞,亦称雷酸汞 $\left[\text{Hg}(\text{ONC})_2 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}\right]$;氮化铅,亦称迭氮化铅 $[\text{Pb}(\text{N}_3)_2]$;三硝基间苯二酚铅, $[\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb} \cdot \text{H}_2\text{O}]$;二硝基重氮酚, $[\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_2\text{N}_2\text{O}]$ 等。

猛性炸药 工业和军事中用途最广的炸药,一般都在较大冲能作用下才能爆轰。工业中常用的猛性炸药有两类:①单体猛性炸药,化学成分为单一化合物,如梯恩梯,即三硝基甲苯 $[\text{CH}_3 \cdot \text{C}_6\text{H}_2 \cdot (\text{NO}_2)_3]$;黑索金,即环三亚甲基三硝胺 $[(\text{CH}_2\text{NNO}_2)_3]$;特屈儿,即三硝基苯甲基硝胺 $[\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3 \cdot \text{N} \cdot \text{CH}_3 \cdot \text{NO}_2]$;太恩,即季戊四醇四硝酸酯 $[\text{C}(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4]$;硝化甘油炸药,即丙三醇三硝酸酯 $[\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3]$ 和液氧炸药等。②混合猛性炸药,由两种或两种以上成分组成,常用的有硝铵类和硝化甘油类两类。硝铵类炸药主要成分为硝酸铵 (NH_4NO_3) ,可混合梯恩梯、木粉等成为铵梯炸药;与柴油、木粉等混合成铵油炸药;加入黑索金等成高威力炸药;外观呈浆糊状的浆状炸药等。硝化甘油类炸药主要成分为硝化甘油,加胶质棉、硝石、木粉和其他物质组成,俗称胶质炸药,抗水性强,密度高,威力大,分普通胶质炸药和耐冻胶质炸药。

发射药 用作枪炮或火箭推进剂的炸药。按其化学成分可分为有烟火药(黑火药)和无烟火药(硝化纤维火药)。

炸药性能 指炸药的威力、猛度、爆速和殉爆等指标。①威力。泛指炸药所具有的总能量,在理论上可近似地用炸药的做功能力表示,常用铅铸扩大法测定。②猛度。炸药爆炸瞬间与之接触的局部固体介质的破碎程度,常用铅柱压缩法测定。③爆速。炸药在爆炸时爆轰波沿着炸药稳定传播时的传播速度,测定的方法较多,常用的有导爆索法、电测法或高速摄影法。④殉爆。在炸药爆炸时引起与其不相接触的邻近药包爆炸的现象,用殉爆距测定。

中国人发明的黑火药,是古代中国四大发明(指南针、火药、纸、印刷术)之一。13~14世纪时,黑火药传入阿拉伯和欧洲诸国,长期以来,广泛应用于军事和工农业生产建设上,对人类文明起到很大的推动作用。19世纪70年代末瑞典人A. B. 诺贝尔(A. B. Nobel)发明用硝化甘油制成工业炸药,才取代了黑火药在炸药中的地位。

(王守道)

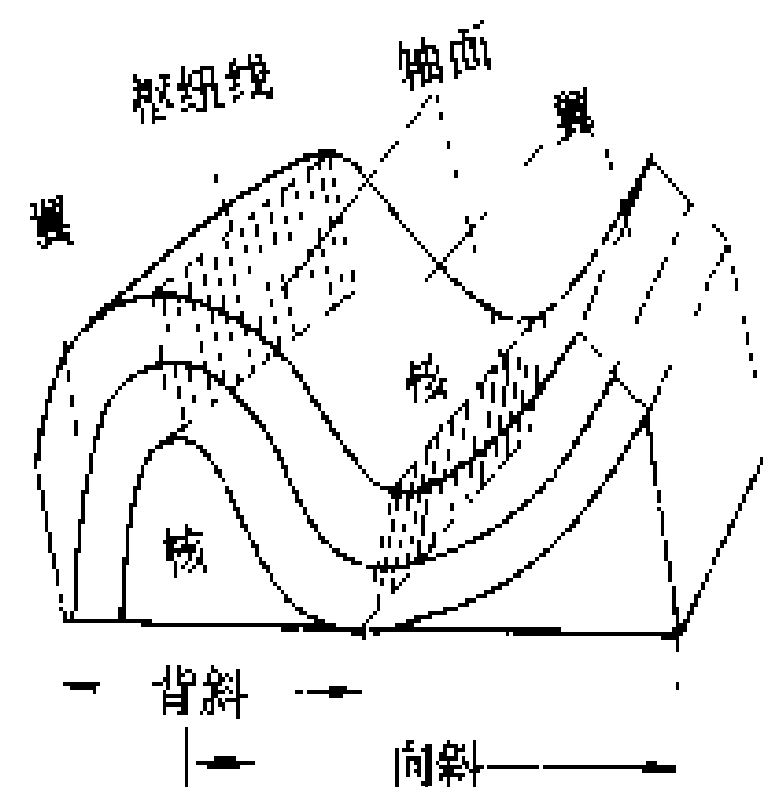
zhezhou

褶皱 (fold) 在构造应力作用下岩层产生连



续永久性弯曲变形而形成的一种最常见的地质构造形态,亦称褶皱。原始岩层一般为水平状态,自然界中常见的倾斜和弯曲岩层均为褶皱构造所致。大的褶皱范围可达数十到数百公里,而小的褶皱则可出现于手标本上。褶皱的基本单元为背斜和向斜。背斜岩层向上拱曲,核部岩层较老,两翼岩层较新;向斜反之。多个背斜和向斜的组合形态称复式褶皱。此外,有的褶皱在主褶皱内还发育多个次级褶皱。

褶皱要素 见图所示。



褶皱要素示意图

核:褶皱的中心部位。

翼:核的两侧岩层。

枢纽线:褶皱的同一层面上各最大弯曲点的连线;其产状即为褶皱的倾伏产状,由方位角和倾伏角来确定。

轴面:连接褶皱各层的枢纽线所构成的面,其产状由走向、倾向和倾角来确定。

褶皱分类

主要按褶皱形态、轴面和枢纽线产状分为开阔褶皱、紧密褶皱、箱状褶皱、圆弧褶皱、直立褶皱、倒转褶皱、平卧褶皱、水平褶皱和倾伏褶皱。

褶皱的工程地质性质 褶皱发育区通常伴生有断层、裂隙、层间错动等地质构造,工程地质条件较复杂。一般说来,褶皱轴部张性构造发育,岩体较破碎,多为透水区或富水区。就硬岩而言,褶皱核部残余构造应力值较大,对地下工程轴线的选择及工程边坡的稳定有影响;位于背斜核部的地下工程基于岩层的天然拱效应,顶拱围岩稳定性较好;位于向斜核部的地下工程顶拱围岩稳定性则相对较差。层间错动使层面物质的工程性质恶化,常构成滑动面,是工程地质勘察中需要注意的问题。

(韦 港)

Zhexi Shuidianzhan

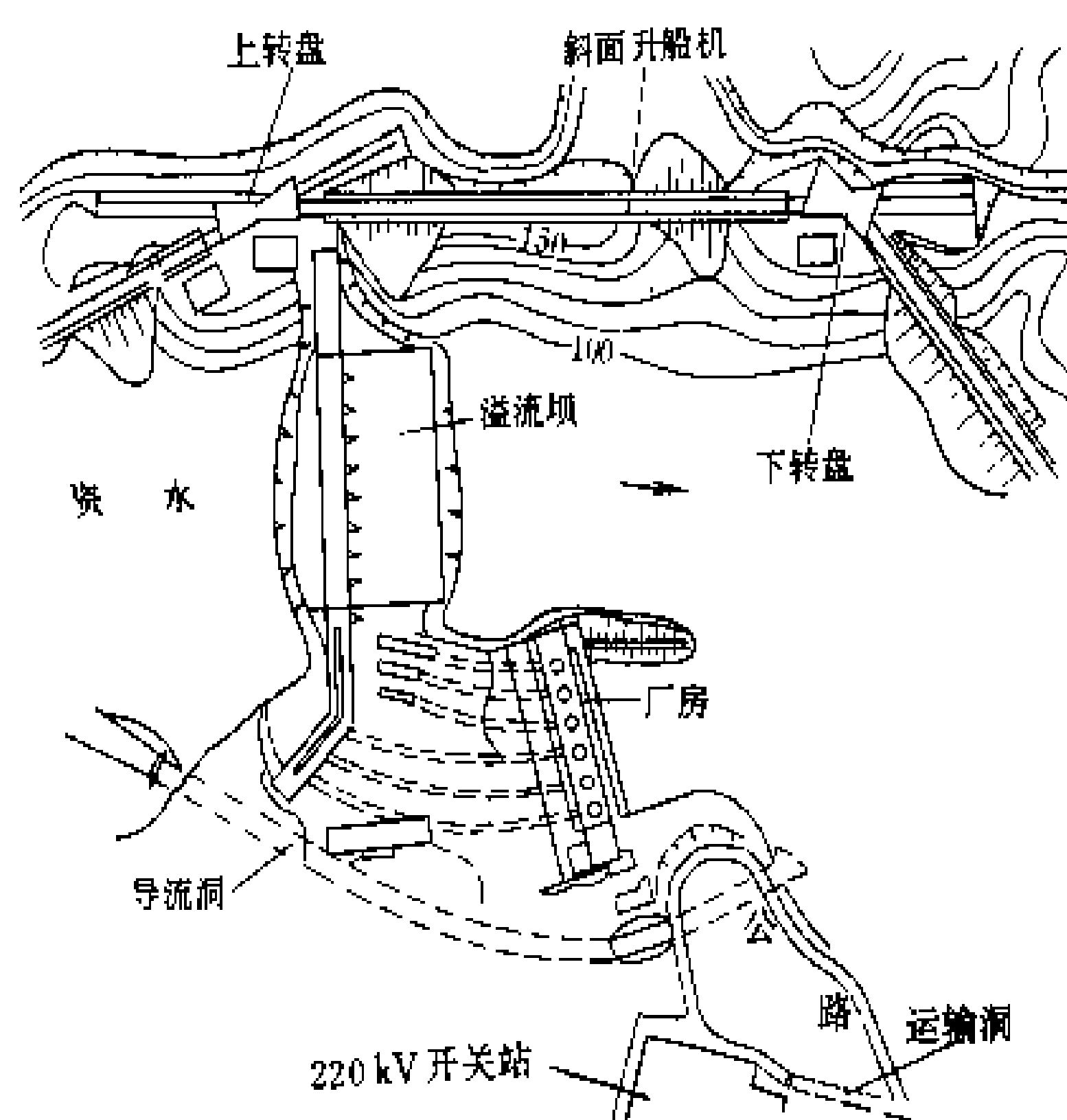
柘溪水电站 (Zhexi Hydropower Station)

位于湖南省安化县境内资水干流上。电站以发电为主,兼有防洪和航运等效益。装机容量 447.5 MW,保证出力 112.7 MW,多年平均年发电量 21.74 亿 kW·h。以 220 kV 和 110 kV 输电线路各 3 回向湖南省电网供电。主坝为混凝土单支墩大头坝,最大坝高 104 m。工程于 1958 年 7 月开工,1962 年 1 月第一台机组发电,1975 年 7 月全部投产。

水文和水库特性 坝址以上流域面积 22640

km²。多年平均年径流量 185 亿 m³。水库总库容 35.65 亿 m³,具有不完全年调节性能。大坝设计洪水标准为二百年一遇,设计洪水流量 16500 m³/s,相应库水位 171.19 m。校核洪水标准为千年一遇,校核洪水流量 20400 m³/s,相应库水位 172.71 m,总库容 35.65 亿 m³。正常蓄水位设计为 167.5 m,实际运行 169.5 m,相应库容 30.2 亿 m³。死水位 144 m,死库容 7.62 亿 m³。调节库容 22.58 亿 m³。汛期防洪限制水位 165 m,防洪库容 7 亿 m³。实际运行中防洪限制水位控制在 165~166 m 左右。电站设计水头 60 m,最大水头 74 m,最小水头 46.8 m。

枢纽布置 枢纽由大坝、发电厂房、泄水建筑物和过坝设施等建筑物所组成,见图。



柘溪水电站枢纽平面布置图

大坝河床部分为混凝土单支墩大头坝,两岸非溢流坝段为混凝土宽缝重力坝。坝基岩石主要为细砂岩,长石石英砂岩,间有砂质泥质板岩。坝顶高程 174 m,防浪墙高 1.5 m。坝顶长度 330 m。溢流坝设有 9 个坝顶溢流孔,每孔高 9 m,宽 12 m。孔口设平面闸门。由电动卷扬机启闭。溢流堰顶高程 153 m,最大泄流能力 16160 m³/s。差动式鼻坎挑流消能。

溢流坝段 1 号、2 号支墩,施工时,迎水而发生表面裂缝,蓄水运行后逐年发展,形成劈头裂缝,产生漏水。其他支墩的迎水面裂缝也均有不同程度的发展。1981~1984 年进行了全面加固处理,将高程 130 m 以下坝腔回填混凝土,回填量为 10.5 万 m³。

岸边引水式发电厂房长 84.5 m,宽 20.5 m,高 40.1 m。由 6 条隧洞后接 6 条压力钢管引水,隧洞和钢管直径分别为 6.5 m 和 5.5 m。进口底坎高程 131 m。厂房内安装 6 台混流式水轮发电机组,其中 1 台单机

容量为 72.5 MW,其余 5 台单机容量为 75 MW。水轮机转轮直径为 4.1 m。

开关站位于发电厂房右侧,2 组单相变压器和 2 台三相变压器布置在主厂房上游侧,单相变压器组容量分别为 180 MV·A 和 360 MV·A,三相变压器每台容量为 90 MV·A。

左岸设有斜面升船机,通航吨位为 50t。

运行效益 1962 年第一台机组发电至 1990 年底,累计发电量 486.55 亿 kW·h。防洪方面,自 1962 年水库蓄水以来,发生洪峰流量在 8000 m³/s 以上的洪水有 5 次,其中 1971 年 5 月洪水,洪峰流量 10440 m³/s,接近二十年一遇频率洪水,洪峰水位 166.81 m,最大下泄流量 6920 m³/s,消减了 34%。航运方面,改善了上游航道 120 km,下游航道 170 km。

设计和施工单位 中南勘测设计院设计,柘溪水电工程局施工。

(谷云青)

zhendun

镇墩 (anchorage block) 固定引水明管的建筑物。它一般靠自重平衡作用于其上的各种外力。镇墩一般做成封闭式,见图(a),但也有做成开敞式的,见图(b)。

镇墩的位置有五种情况:①水管向下弯曲处;②水管向上弯曲处;③水管水平转弯处;④水管空间转弯处;⑤在水管直段上。布设在水管向下转弯处的镇墩,上下相邻两管传来的力,有使镇墩沿地基滑动的趋势。但其合力有一个垂直地面指向下的分力,有利于镇墩的稳定。布设于水管向上转弯处的镇墩,上下相邻两管传来的力,有一个使镇墩离开地面的分力,对镇墩稳定性不利,此时要加大镇墩的体积,以保证

zhengfa

蒸发 (evaporation) 温度低于水的沸点时,水汽从水体(液态水或固态水)或其他含水物质表面逸入大气的现象。是水循环中的一个重要环节,是研究水资源开发利用所依据的基本资料之一。一定时段内逸入大气的水量所折算的水层厚度为蒸发量,以 mm 计。蒸发量主要决定于太阳辐射强度,同时与蒸发面上的风速、气压和蒸发面的性质、位置等因素有关,因此蒸发量随纬度、季节、时刻、水质等情况而变。

一个闭合流域的总蒸发量是陆面蒸发量、植物蒸发量和水体蒸发量之和。根据水量平衡原理,多年平均蒸发量可由相应的降水量减去径流量求得。

水利水电建设中,要研究兴建水库后库区由陆面蒸发变为水面蒸发出现的水库水量变化问题。确定水面蒸发的途径有二:①用仪器直接测定,称器测法;②根据水量平衡和热量平衡原理经分析计算间接推求。影响蒸发的因素比较复杂,通过分析计算推求的蒸发量误差较大,用器测法测定蒸发量,方法简便,为目前确定水面蒸发量的主要途径。

用不同类型的蒸发器与不同的安置方式(陆上或水上漂浮)所测得的蒸发量是不同的。目前认为在自然水体的蒸发量难以直接测定的情况下,根据陆上设置的大型蒸发池(口径面积在 10 m² 及以上)所测得的蒸发量可近似代表自然水体的蒸发量。每日早 8 时观测大型蒸发池的水面变化,减去当日降水量即为日蒸发量。累积一年的日蒸发量可求得年蒸发量。

(夏方佐)

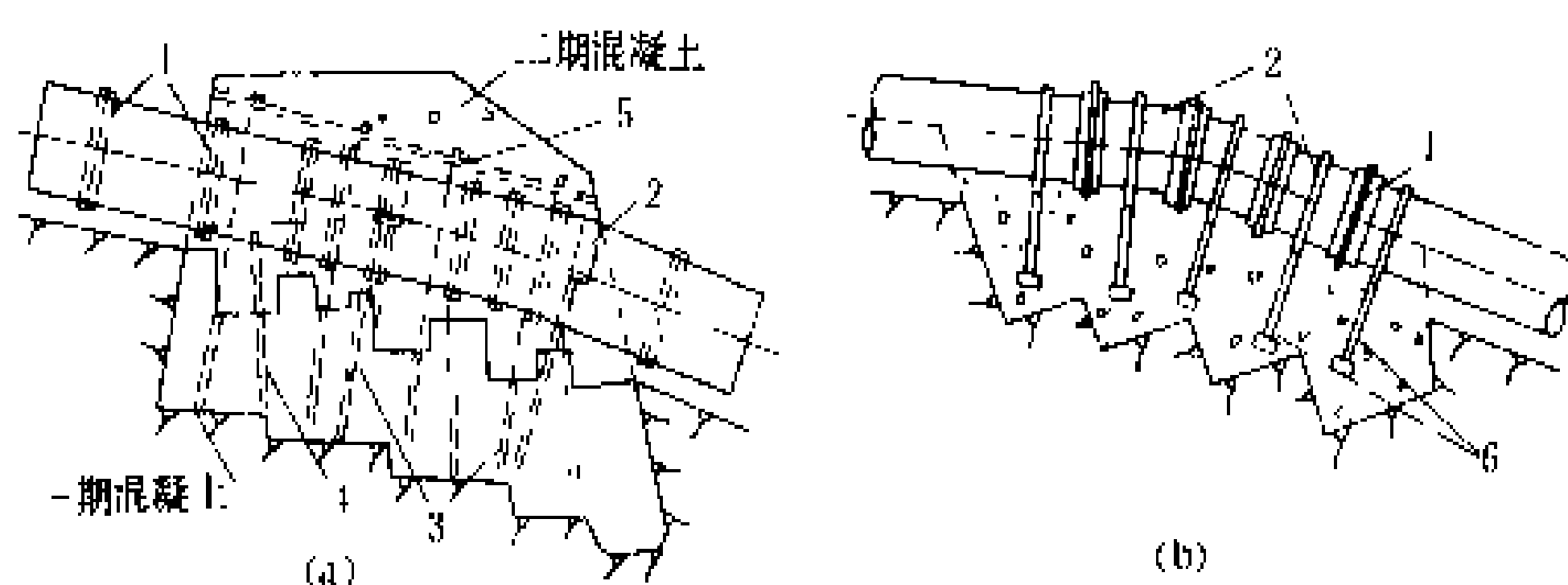
zhengchang xushuiwei

正常蓄水位 (normal storage water level)

为开发水资源目的而设定的正常情况下允许的水库最高蓄水位。它是坝式水电站和混合式水电站水库重要的特征值。

在水库的运行中,水位达到正常蓄水位的频率,决定于水库的调节性能及其调节任务。无调节水电站,库水位经常维持在正常蓄水位。日调节水电站,每天至少有一次达到正常蓄水位。季或年调节水电站,每年至少有一次达到正常蓄水位。多年调节水电站,若遇到连续枯水年,则水库从库满开始消落一直到库空再充蓄到库满以前的整个周期的年份中,都蓄不到正常蓄水位。对于防洪与径流调节共用库容的水库,汛期水位常低于正常蓄水位。

提高正常蓄水位,不但可增加水电站的水头,还相应增加水库的调节库容,从而增加其调节流量,大幅度



镇墩的构造型式

(a)封闭式;(b)开敞式

1—角钢箍环;2—拉环;3—锚筋;4—插筋;5—抗拉钢筋;6—支架

稳定。在一个长而直的水管上,至少每隔 100~150 m,设置一个镇墩。

(刘维德 王树人)



地提高其能量效益。位于梯级水电站上游的水电站或负有补偿调节任务的水电站的水库,提高其正常蓄水位,除增加其本身的能量效益外,还可增加梯级或电力系统中水电站群的能量效益。但是,正常蓄水位的提高要受限制,并须付出较大的经济代价。主要限制有:①坝址和水库地形地质条件和筑坝技术的限制,坝只能建到一定的高度。②重要城镇和密集居民点、重要交通干线、大片农田、文物古迹、自然保护区和旅游风景区等不允许淹没。经济代价主要是:①提高正常蓄水位,要相应增加坝高、坝长和坝底宽,坝体工程量的增加值与正常蓄水位的增值常呈大于2次方的指数关系(薄拱坝除外)。②提高正常蓄水位常常导致水库区城镇、工矿、农田的淹没,交通及通信线路和相应的移民,从而带来水库淹没赔偿和移民费用,这种费用常常占水电站工程费用的很大比重。因此,正常蓄水位的选择(国外也叫库容选择),是水电规划设计中十分重要的技术经济问题。

正常蓄水位的选择,要进行技术经济比较,在技术经济比较中,要注意如下的问题:①充分重视水库移民安置的困难。②在河流梯级开发规划中,应考虑调节水库的有利配置和梯级的合理衔接。③从地区水能合理利用出发,应考虑调节库容的合理地理分布。

(伍宏中)

zhidunba

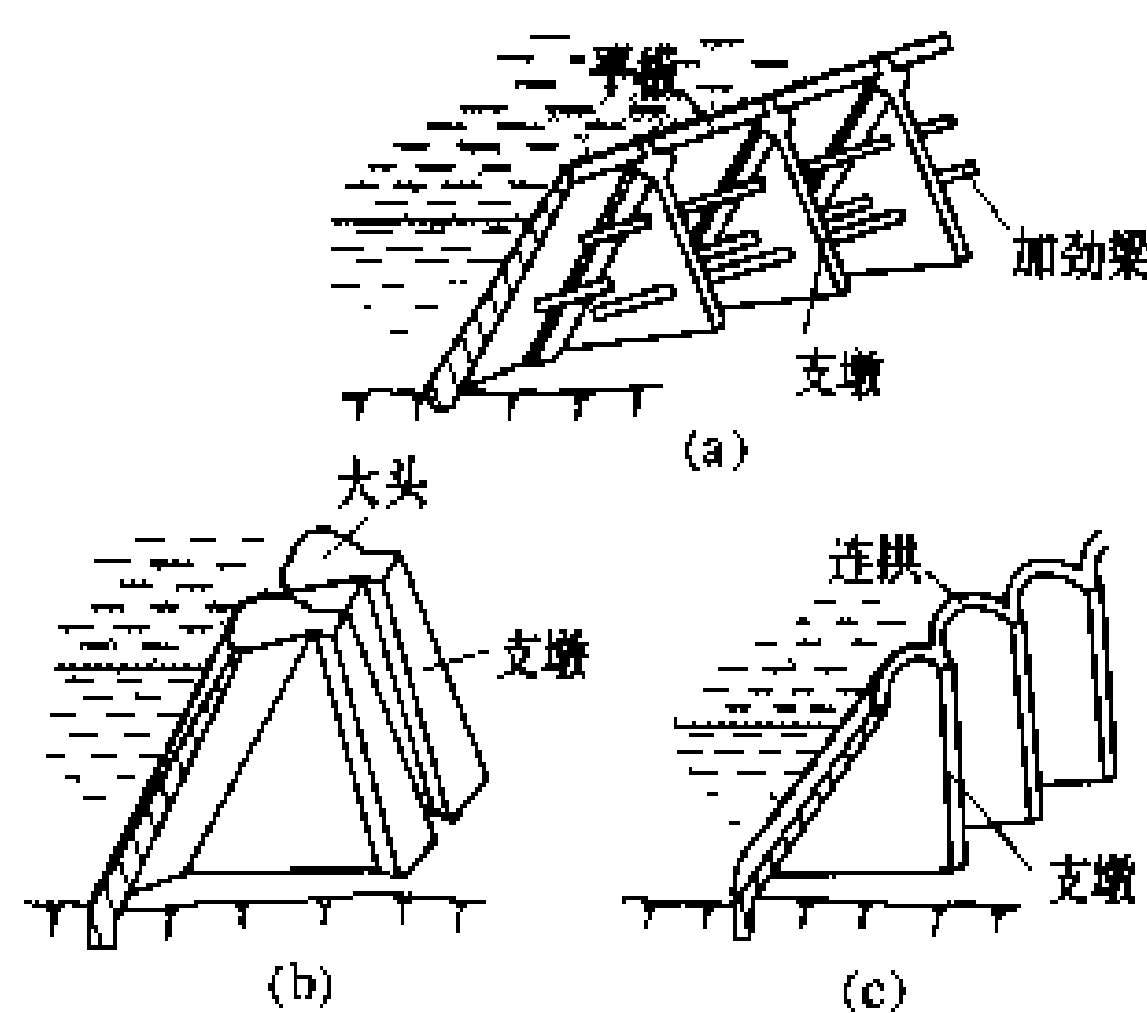
支墩坝 (buttress dam) 由向上游倾斜的挡水面板(或实体)和支墩所组成的坝。坝体所受水、泥沙等载荷,通过挡水面板、支墩传至坝基。支墩坝较重力坝的体积小,属轻型坝的范畴,需建在岩质坝基上。支墩坝也可做成溢流坝或在坝体内布设坝身泄水孔。这种坝型多用于较宽的坝址。

发展简史 这种坝型发展较晚。最早16世纪西班牙修建了埃尔奇(Elche)砌石连拱坝,坝高23 m。至20世纪初期钢筋混凝土支墩坝才得到较快的发展。1903年在美国首先创建了平板坝。当今最高的平板坝是1949年在阿根廷修建的艾思卡巴(Escaba)坝,坝高38 m。最早于1926年提出大头坝,1930年墨西哥修建了马丁(Martin)单支墩大头坝,坝高105 m,由于结构简单,一般不放置钢筋,应用较广。目前世界上最高的大头坝是在巴西修建的伊泰普(Itaipu)坝,高196 m。最高的连拱坝是加拿大的丹尼尔约翰逊(Daniel Johnson)坝,高214 m。本世纪初,支墩坝多采用轻薄型的钢筋混凝土结构。及至60年代有向加大坝体厚度、简化施工的大体积混凝土方向发展的趋势。

20世纪50年代至60年代中国先后建成了佛子岭、梅山连拱坝和磨子潭、新丰江、柘溪、桓仁大头坝等

七座支墩坝。其中1956年建成的梅山连拱坝高88.2 m是当时世界上最高的连拱坝。中国在中小型工程中用传统砌石工艺建成的中、低砌石支墩坝为数极多,如四川丰岩砌石连拱坝、湖南沅口砌石大头坝,坝高分别为60 m和62 m。

类型 支墩坝以挡水结构型式分为平板坝、大头坝和连拱坝(见图)。平板坝的挡水结构为钢筋混凝土平板,上游坝坡 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$;大头坝由扩大的支墩头部挡水。头部上游面有直线式、折线式、弧线式,上游坝坡 $1:0.3\sim 1:0.6$ (垂直:水平);连拱坝由拱形面板挡水(见连拱坝)。



支墩坝类型

(a)平板坝;(b)大头坝;(c)连拱坝

支墩一般呈三角形,有单支墩及双支墩两类。支墩上游边支承挡水结构,底部座落在地基上。为增强单支墩的侧向稳定和纵向刚度,支墩间常设置加劲肋、梁或墙。双支墩由两片墙组成,中间有隔墙连接,在平剖面上呈框格状。双支墩侧向刚度和稳定性高,常适用于较高的坝。

特点 支墩坝的优点有:①支墩间空隙大,对坝基排水和减少渗压力有利;且迎水面向上游倾斜,斜面上的水重对坝体稳定有利。这种坝的坝体体积一般仅为重力坝的 $1/3\sim 2/3$ 左右。②可视工程具体情况调整坝体结构和参数如挡水结构及支墩型式以及相应的跨度及厚度等,可使材料强度得到较充分的利用。支墩坝的缺点有:①坝体单薄,渗径短,对气温影响较灵敏,易产生裂缝,故对混凝土的强度、抗渗及抗冻等质量要求较高。②施工难度较大,模板多而复杂,对机械化施工不利。以上缺点对薄型支墩坝尤为突出。

结构分析 支墩坝为三维结构。分析挡水面板结构应力时,往往垂直于迎水面截取出一单宽体,即一简支单宽平板,连拱框架,或大头体。前二者可按一般结构理论进行分析计算,而后者可按有限差分法或有限元法分析。支墩的设计分析可以一个坝段进行整体分析,其稳定及应力分析方法与重力坝类似(见重力坝)。由于支墩坝侧向(即顺坝轴线方向)刚度及稳定性小,

对地震时的侧向稳定、应力、刚度(即自振频率)要核算。对较高的支墩还要进行纵向弯曲稳定分析;对高坝或重要工程,除进行计算分析外,必要时还要辅以光弹和结构模型试验。支墩坝岸坡坝段的稳定,包括部分基岩沿软弱面的稳定要注意核算,必要时要在工程上采取有效的措施。

(曹楚生)

Zhongguo da - zhongxing shuidianzhan

中国大中型水电站 (large and medium sized hydropower stations in China)

中国装机容量 25MW 及以上的水电站。根据中国现行规定,250 MW 及以上为大型,25 MW 及以上至 250 MW(不含 250 MW)为中型。至 1990 年底中国投入电力系统运行的 127 座大中型水电站(台湾省统计数字和水电建设情况暂缺,下同),设计总规模 24803.9 MW,已装机容量 22376.6 MW,为全国水电装机容量 36045.5 MW 的 62.1%;1990 年发电 870 亿 kW·h,为当年全国水电站发电量 1179.49 亿 kW·h 的 73.8%。127 座水电站中,大型水电站 28 座,设计总规模 17637.45 MW,1990 年底前已装机 14944.2 MW。容量最大的是长江干流上的葛洲坝水利枢纽的电站,为 2715 MW。表中列出了 28 座大型水电站的主要参数。

水库及其综合利用 127 座水电站共 126 座水库(水丰水电站与长甸水电站共有一座水库)。其中,总库容 1 亿 m³ 及以上的有 79 座,占 62.7%。库容 100 亿 m³ 及以上的有 8 座。总库容最大的是黄河上的龙羊峡水电站的水库,为 276.3 亿 m³。

127 座水电站中,具有多年调节水库的 31 座,具有年或季调节水库的 35 座,具有月、周或日调节水库的 46 座,其余 15 座为径流式水电站。有调节能力的水电站都能担负电力系统的调峰任务。随着电力系统的扩大,系统内不同流域的水电站群还可起到水文上的补偿作用。具有多年、年或季调节能力的水电站还能调节天然径流的不平衡,提高本电站和下游梯级水电站的保证出力,改善枯水年份或枯水季节电力系统的电力供应。由于水轮发电机组开机带负荷快,有调节能力的大中型水电站大都担负事故备用和负荷备用任务,有的还是电力系统调频的主力。

127 座水电站中,具有综合利用效益的 85 座,占 66.9%。28 座大型水电站中,具有显著综合利用效益的 24 座,占 85.7%。综合利用有除害兴利两个方面。除害,主要是防洪和防凌;兴利,主要有发电、灌溉、航运、城市供水、过木、养殖、旅游等项。127 座水电站中,46 座有显著防洪效益,其中黄河上的龙羊峡、刘家峡、三门峡和天桥等 4 座水电站还有防止下游冰凌危害的

效益。龙羊峡水电站的水库建成后,提高了下游刘家峡、盐锅峡和八盘峡等 3 座水电站和兰州市的防洪标准。127 座水电站中,56 座有灌溉效益,如宁夏回族自治区黄河上的青铜峡水电站,灌溉渠道最大引水流量为 630 m³/s,设计总灌溉面积 600 万亩,促进了引黄灌区的发展。大中型水电站中有航运效益的有 25 座。根据葛洲坝工程局水文实验站 1985 年 3 月提出的《葛洲坝水利枢纽蓄水后库区水沙因素及航道变化情况析》资料,葛洲坝水库建成后,当流量等于和小于 20000 m³/s 时,三峡航道有 80~160 km 得到根本改善,占西陵峡全长 39%~78%;当流量等于 40000 m³/s 时,有 105 km 得到明显改善。大中型水电站的水库作为城市供水水源的有 10 座。潮白河上的密云水库和滦河上的潘家口水利枢纽水库,分别是北京市、天津市和唐山市主要供水水源之一。丹江口水库是南水北调(中线)工程的重要供水水源。

坝型 126 座水库,有混凝土坝 100 座,占 78.7%。28 座大型水电站中,有混凝土坝 26 座,占 92.9%。混凝土坝中,实体重力坝 40 座,宽缝重力坝和空腹重力坝等 21 座,拱坝 13 座,支墩坝(含大头坝、连拱坝和平板坝等)10 座,闸坝 16 座。例如:黄河上游的刘家峡水电站的主坝为实体重力坝,最大坝高 147 m,顶长 204 m;沅江支流酉水上的凤滩水电站的主坝是空腹重力拱坝,最大坝高 112.5 m,中空部分尺寸为 255.8 m(长)×20.5 m(宽)×40.1 m(高);龙羊峡水电站的主坝是重力拱坝,最大坝高 178 m;湘江支流耒水上的东江水电站的主坝是双曲拱坝,最大坝高 157 m,厚高比 0.223;鸭绿江上中朝两国共有的云峰水电站的主坝是宽缝重力坝,最大坝高 113.75 m,空宽比为 0.4;乌溪江上的湖南镇水电站的主坝是梯型支墩坝,最大坝高 129 m。

126 座水库,有土石坝 23 座,占 18.1%。例如,南盘江支流黄泥河上的鲁布革水电站的风化料心墙堆石坝,最大坝高 103.8 m。广东省北江支流南水上的南水水电站的堆石坝,最大坝高 81.3 m,用定向爆破方法筑坝,一次抛掷石方达 105.3 万 m³,有效堆积量 93 万 m³,为坝体石方总量的 67.9%。

126 座水库,有砌石坝 4 座,占 3.2%。

泄洪设施 中国江河干流上的水电站的泄洪流量较大。28 座大型水电站的校核洪水流量超过 20000 m³/s 的有 19 座,占 67.9%。最大的是葛洲坝水电站,设计洪水流量 86000 m³/s,校核洪水流量 110000 m³/s。

多数水电站在坝体上设有泄洪设施,或把挡水建筑物和泄洪设施结合在一起。如葛洲坝水利枢纽的二江闸,孔口尺寸为 12 m×24 m,共 27 孔,总泄流量达 83900 m³/s,堰顶单宽流量达 259 m³/(s·m),护坦单

宽流量达 $170 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。龙羊峡水电站的中孔、深孔和底孔,尺寸分别为 $8 \text{ m} \times 9 \text{ m}$, $5 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ 和 $5 \text{ m} \times 7 \text{ m}$,最大泄流量分别为 $2200 \text{ m}^3/\text{s}$, $1340 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $1500 \text{ m}^3/\text{s}$,最大流速均为 40 m/s 。对于河谷十分狭窄的水电站,常采用坝内式厂房、厂顶溢流式厂房或厂前挑流式厂房等溢洪道与厂房重叠布置方式。当泄流量很大时,还要采取措施使水舌落点分散。如乌江渡水电站,丰水期河面宽约 350 m ,最大泄流量为 $21350 \text{ m}^3/\text{s}$,枢纽采用重叠式布置,泄洪设施的出口采取远、近、高、低错落布置方式,使挑流水舌落点沿河道纵向扩散。坝下游消能防冲方式,多采用挑流消能,也有采用底流消能(如葛洲坝水利枢纽)、面流消能(如西津水电站)和屏流消能(如石泉水电站)的。近年来,广泛采用了一些新型消能工,如窄缝挑流、异型鼻坎、宽尾墩和“T”形墩等。如安康水电站采用宽尾墩与消力池相结合的消能方式,消能率提高,下游流速降低,大大减轻了河床冲刷和尾水波动,并且可使消力池长度缩短 $1/2 \sim 1/3$ 。

许多大中型水电站布置了泄洪隧洞。较大的如:碧口水电站右岸泄洪洞,宽 13 m ,高 11.5 m ,最大泄流量 $2250 \text{ m}^3/\text{s}$,洞内最大流速 $35.7 \text{ m}^3/\text{s}$;刘家峡水电站右岸泄洪隧洞,宽 8 m ,高 12.9 m ,长 592 m ,设计水头 60 m ,设计最大泄流量 $2140 \text{ m}^3/\text{s}$,洞内最大流速 $45 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

岸边溢洪道是土石坝枢纽泄放大流量常用的布置方式。如碧口水电站右岸岸边开敞式溢洪道,最大泄流量 $2310 \text{ m}^3/\text{s}$ 。混凝土坝枢纽也常采用岸边溢洪道。较大的如龙羊峡水电站右岸溢洪道,孔口尺寸 $12 \text{ m} \times 17 \text{ m}$,单孔泄流量 $2245 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

坝基处理 防渗广泛采用水泥帷幕灌浆。加固采用水泥灌浆和环氧、聚氨脂、丙凝等化学灌浆,以及高压喷射灌浆等技术。如:乌江渡水电站在喀斯特发育地区用压力达 6 MPa 的灌浆处理坝基,建成了 165 m 高的拱形重力坝;铜街子水电站采用 30 MPa 高压喷射灌浆水泥工艺置换缓倾角夹层的泥化物。

抗滑齿槽、槽塞、洞塞等混凝土置换技术和预应力锚索 广泛使用在复杂岩基。如龙羊峡水电站坝区断层发育,近坝体存在 8 条主要断层,两岸坝肩采用传力槽塞、抗剪洞塞、置换墙以及高压固结灌浆等措施处理。铜街子水电站用 320 t 位的锚索以保证导流明渠右导墙的抗滑稳定。

防渗墙、沉井、抗滑桩和振冲法提高砂土密度等技术 用于处理软基,如铜街子水电站左岸导流边墙的防渗墙深 74 m ,并用振冲法处理砂层。

发电厂房 127 座水电站中有坝后式厂房(含厂顶溢流厂房和厂顶挑流厂房)32 座,河床式厂房 18 座(含闸墩式厂房 1 座),坝内式厂房 5 座,地下式厂房 18 座(含半地下式厂房 2 座,窑洞式厂房 1 座),岸边

式厂房 48 座,混合式厂房(厂房一半在坝后,一半为窑洞;或一个电站有两个不同型式的厂房)6 座。红水河上的大化水电站的厂房是承受水头最高(39.5 m)的河床式厂房。葛洲坝水利枢纽的发电厂房是中国最大的河床式厂房,其大江厂房尺寸为 596.2 m (长) \times 33 m (宽) \times 76.14 m (高),二江厂房尺寸为 327 m (长) \times 33 m (宽) \times 77.15 m (高)。丰满水电站和丹江口水利枢纽的电站厂房是坝后式厂房。新安江水电站的厂房是厂顶溢流式厂房。凤滩水电站的厂房是中国最大的坝内式厂房,尺寸为 85 m (长) \times 20.5 m (宽) \times 40.1 m (高)。白山水电站的厂房是中国已建成工程中最大的地下式厂房,开挖轮廓尺寸为 121.5 m (长) \times 25 m (宽) \times 54.25 m (高)。

发电引水系统 127 座水电站中,河床式厂房采用矩形混凝土引水道,如葛洲坝水利枢纽的大江和二江厂房。坝内式厂房和坝后式厂房一般为坝内钢管引水,如龙羊峡水电站,压力钢管直径 7.5 m ,厚 $20 \sim 40 \text{ mm}$ 。少数坝后式水电站采用坝后背管形式,如东江水电站,双曲拱坝,坝后式厂房,压力钢管直径 5.2 m ,先水平穿过坝体,再沿下游坝面向下进入厂房。也有个别水电站采用坝前管的形式,如凤滩水电站,空腹重力拱坝坝内式厂房,压力钢管直径 5.6 m ,紧贴上游坝面向下,然后水平进厂房。

地下式厂房和岸边式厂房 一般用隧洞引水,长隧洞末端或有压尾水洞的首端一般设有调压井。如白山水电站,坝式开发,一期右岸地下式厂房,3 条引水隧洞分别长 287.6 m , 242.8 m 和 223.2 m ,最大洞径 8.6 m ,各向 1 台机组供水,在每台机组的有压尾水隧洞(分别长 250.7 m , 222.3 m 和 196.88 m)设有调压井。如鲁布革水电站,引水式开发,地下式厂房,1 条引水隧洞,内径 8 m ,长 9387 m ,隧洞末端设有调压井。

机组和高压配电装置 127 座水电站中,最大的转桨式机组装于葛洲坝水利枢纽的二江电厂,单机容量为 170 MW ,额定水头 18.6 m ,水轮机转轮直径 11.3 m 。最大的混流式机组装于龙羊峡水电站,单机容量为 320 MW ,额定水头 122 m ,水轮机转轮直径 6 m 。

127 座水电站中,使用冲击式机组的高水头电站有 6 座,使用水头最高的是云南省以礼河上的盐水沟水电站,额定水头 589 m ,最大水头 629 m ,水轮机为卧式,节圆直径 1700 mm ,最高效率 90% ,配相应的发电机,机组额定功率 36 MW 。使用混流式机组的有 88 座,占 69.3% , (其中 3 座电站装有混流可逆式抽水蓄能机组)使用的最高水头为 372.5 m ,其水轮机转轮直径 4.1 m ,机组单机容量 150 MW ,装在鲁布革水电站(额定水头 327.7 m ,最大水头 372.5 m ,最小水头 295 m)。有 32 座低水头水电站使用轴流式机组(包括转桨

中国大型水电站参数表

电站名称	葛洲坝	白山
建设地点	湖北 宜昌	吉林 桦甸
所在河流	长 江	第二松花江
坝址以上流域面积(km ²)	1000000	19000
多年平均流量(m ³ /s)	14300	239
设计/校核洪水标准(p)	历史最大洪水	0.2%/0.02%
设计/校核洪水流量(m ³ /s)	86000/110000	19100/26200
正常蓄水位/死水位(m)	66/63	413/372(一期);413/380(二期)
总库容(亿 m ³)	15.8	62.15
水库调节性能	无	不完全多年调节
主坝坝型	闸坝	重力拱坝
最大坝高/坝顶高程(m)	53.8/70	149.5/423.5
主要泄洪设施	二江泄水闸 27—12×24 三江冲沙闸 6—12×10.5 大江泄水冲沙闸 9—12×19.5	表孔 4—12×13 深孔 3—6×7
设计/最大/最小水头(m)	18.6/27/8.3	110/126/81(一期);112/126/86(二期)
厂房型式	河床式	一期地下式;二期岸边式
水轮机型式	转桨式	混流式
水轮机转轮直径(m)	11.3; 10.2	5.5
装机容量(MW)	2715	1500(一期 900; 二期 600)
保证出力(MW)	768	167(一期)
机组台数×单机容量(MW)	2×170+19×125	一期 3×300; 二期 2×300
年发电量(亿 kW·h)	157	20.37(一期 20.03; 二期 0.34)
输电电压(kV)	500; 220; 直流±500	220
高压配电装置型式	屋外式	一期临时屋外式; 二期屋外式
开工/发电/竣工年份	1970/1981/1989	1975/1983/1984(一期);1984/1992/...(二期)
设计单位	长江流域规划办公室	东北勘测设计院
施工单位	葛洲坝工程局	水利电力部第一工程局
电站名称	龙羊峡	刘家峡
建设地点	青海 共和、贵德	甘肃 永靖
所在河流	黄 河	黄 河
坝址以上流域面积 (km ²)	131420	181766
多年平均流量 (m ³ /s)	650	867
设计/校核洪水标准 (p)	0.1%/PMF	0.1%/0.01%
设计/校核洪水流量 (m ³ /s)	7040/10500	8860/10600
正常蓄水位/死水位 (m)	2600/2530	1735/1694
总库容 (亿 m ³)	276.3	61.2
水库调节性能	多年调节	不完全年调节
主坝坝型	重力拱坝	重力坝
最大坝高/坝顶高程 (m)	178/2610	147/1739
主要泄洪设施	表孔 2—12×17 中孔 1—8×9 深孔 1—5×7 底孔 1—5×7	溢洪道 3—10×8.5 中孔 2—3×8 泄洪洞 1—8×12.9 排沙洞 1—2×2.8
设计/最大/最小水头 (m)	122/148.5/75.5	100/114/70
厂房型式	坝后地下混合式	坝后地下混合式
水轮机型式	混流式	混流式
水轮机转轮直径 (m)	6.0	5.5
装机容量 (MW)	1280	1225
保证出力 (MW)	589.8	557
机组台数×单机容量 (MW)	4×320	3×225+1×250+1×300
年发电量 (亿 kW·h)	59.42	55.8
输电电压 (kV)	330	330; 220
高压配电装置型式	GIS	地下式
开工/发电/竣工年份	1976/1987/1992	1958/1969/1974
设计单位	西北勘测设计院	北京勘测设计院
施工单位	水利电力部第四工程局	水利电力部第四工程局



续表

电站名称	丹 江 口	安 康
建设地点	湖北 丹江口	陕西 安康
所在河流	汉 江	汉 江
坝址以上流域面积 (km ²)	95217	35700
多年平均流量 (m ³ /s)	1200	608
设计/校核洪水标准 (p)	0.1%/0.01%	0.1%/0.01%
设计/校核洪水流量 (m ³ /s)	64900/82300	36700/45000
正常蓄水位/死水位 (m)	157/139	330/300
总库容 (亿 m ³)	209.7	29.25
水库调节性能	多年调节	不完全年调节
主坝坝型	宽缝重力坝	重力坝
最大坝高/坝顶高程 (m)	97/162	128/338
主要泄洪设施	表孔 20—8.5×22.5 深孔 12—5×6	表孔 5—15×17 底孔 4—5×8 中孔 5—11×12
设计/最大/最小水头 (m)	63.5/81.5/57	76.2/88/57
厂房型式	坝后式	坝后式
水轮机型式	混流式	混流式
水轮机转轮直径 (m)	5.5	5.5
装机容量 (MW)	900	800
保证出力 (MW)	247	175
机组台数×单机容量 (MW)	6×150	4×20
年发电量 (亿 kW·h)	38.3	28
输电电压 (kV)	220; 110	330; 110
高压配电装置型式	屋外式	GIS
开工/发电/竣工年份	1958/1968/1974	1978/1990/1992
设计单位	长江流域规划办公室	北京勘测设计院
施工单位	水利电力部第十工程局	水利电力部第三工程局
电站名称	丰 满	龚 嘴
建设地点	吉林 吉林	四川 乐山
所在河流	第二松花江	大 渡 河
坝址以上流域面积 (km ²)	42500	76130
多年平均流量 (m ³ /s)	434	1500
设计/校核洪水标准 (p)	0.1%/0.01%	0.1%/0.01%
设计/校核洪水流量 (m ³ /s)	23200/30200	13700/15800
正常蓄水位/死水位 (m)	261/242	528/518
总库容 (亿 m ³)	107.8	3.39
水库调节性能	不完全多年调节	日调节
主坝坝型	重力坝	重力坝
最大坝高/坝顶高程 (m)	90.5/266.5	85.5/530.5
主要泄洪设施	表孔 11—12×6 泄洪洞 1—φ9.2	表孔 4—12×22 排沙孔 2—5×8 排沙孔 1—5×6
设计/最大/最小水头 (m)	64.2/71.5/49.6	48/53.08/34.7
厂房型式	坝后式	坝后式和地下式
水轮机型式	混流式	混流式
水轮机转轮直径 (m)	4.2~4.35	5.5
装机容量 (MW)	723.75	700
保证出力 (MW)	175	179
机组台数×单机容量 (MW)	5×72.5+2×65+1×60 +1×1.25+2×85	7×100
年发电量 (亿 kW·h)	19.41	34.18
输电电压 (kV)	220	220
高压配电装置型式	屋外式	屋外式
开工/发电/竣工年份	1937/1943/.....	1966/1972/1978
设计单位	丰满水电建设局	成都勘测设计院
施工单位	丰满长春水力电气建设局 (丰满水电工程局改建)	水利电力部第七工程局



续表

电站名称 建设地点 所在河流 坝址以上流域面积 (km ²) 多年平均流量 (m ³ /s) 设计/校核洪水标准 (p) 设计/校核洪水流量 (m ³ /s) 正常蓄水位/死水位 (m) 总库容 (亿 m ³) 水库调节性能 主坝坝型 最大坝高/坝顶高程 (m) 主要泄洪设施 设计/最大/最小水头 (m) 厂房型式 水轮机型式 水轮机转轮直径 (m) 装机容量 (MW) 保证出力 (MW) 机组台数×单机容量 (MW) 年发电量 (亿 kW·h) 输电电压 (kV) 高压配电装置型式 开工/发电/竣工年份 设计单位 施工单位	新安江 浙江 建德 新安江 10480 357 0.1%/0.01% 27600/41280 108/86 220 多年调节 宽缝重力坝 105/115 表孔 9—13×10.5 84.3/73/57.8 坝后厂顶溢流 混流式 4.1 662.5 178 5×72.5+4×75 18.6 220; 110 屋外式 1957/1960/1978 上海勘测设计院 水利电力部第十二工程局	乌江渡 贵州 遵义 乌江 27790 502 0.2%/0.02% 19200/24400 760/720 23 季调节 拱形重力坝 165/765 表孔 6—13×19 泄洪洞 2—9×10* 中孔 2—4×4 120/134.2/94.2 坝后厂顶挑流 混流式 5.2 630 202 3×210 33.4 220; 110 GIS 1974/1979/1983 中南勘测设计院 水利电力部第八工程局
电站名称 建设地点 所在河流 坝址以上流域面积 (km ²) 多年平均流量 (m ³ /s) 设计/校核洪水标准 (p) 设计/校核洪水流量 (m ³ /s) 正常蓄水位/死水位 (m) 总库容 (亿 m ³) 水库调节性能 主坝坝型 最大坝高/坝顶高程 (m) 主要泄洪设施 设计/最大/最小水头 (m) 厂房型式 水轮机型式 水轮机转轮直径 (m) 装机容量 (MW) 保证出力 (MW) 机组台数×单机容量 (MW) 年发电量 (亿 kW·h) 输电电压 (kV) 高压配电装置型式 开工/发电/竣工年份 设计单位 施工单位	水丰 辽宁 宽甸 朝鲜 平安道朔州郡 鸭绿江 47586 812.7 0.1%/0.01% 50200/63100 123.3/95 147 多年调节 重力坝 106/126.4 表孔 26—12×7.3 备用溢洪道 10—10×9 77/93.4/66 坝后式 混流式 4.3 630/2 (7×90)/2 34.8/2 220 屋外式 1937/1941/1958 伪满鸭绿江水电公司 朝鲜鸭绿江水电公司	鲁布革 云南 罗平 贵州 兴义 黄泥河 7300 164 0.2%/PMF 6460/10880 1130/1105 1.11 周调节 风化料心墙堆石坝 103.8/1138 溢洪道 2—13×18 泄洪洞 1—φ11.5 泄洪洞 1—φ10 排沙洞 1—φ5 327.7/372.5/295 地下式 混流式 3.442 600 85 4×150 28.49 220; 110 GIS 1982/1988/1990 昆明勘测设计院 水利电力部第十四工程局

* 系隧洞进口孔口尺寸。

续表

电站名称	东 江	万 安
建设地点	湖南 资兴	江西 万安
所在河流	耒 水	赣 江
坝址以上流域面积 (km ²)	4719	36900
多年平均流量 (m ³ /s)	144	947
设计/校核洪水标准 (p)	0.1%/ (0.01%+20%)	0.1%/0.01%
设计/校核洪水流量 (m ³ /s)	13900/24100	27800/33900
正常蓄水位/死水位 (m)	285/237	100/90
总库容 (亿 m ³)	91.5	22.16
水库调节性能	多年调节	不完全年调节
主坝坝型	双曲拱坝	重力坝
最大坝高/坝顶高程 (m)	157/294	58/104
主要泄洪设施	溢洪道 3—10×7.5 泄洪洞 1— ϕ 10 放空洞 1— ϕ 8.9 (不泄洪)	表孔 9—14×16 底孔 10—7×9
设计/最大/最小水头 (m)	118.5/139/81	22.0/32.3/12.8
厂房型式	坝后式	河床式
水轮机型式	混流式	转桨式
水轮机转轮直径 (m)	4.1	8.5
装机容量 (MW)	500	500
保证出力 (MW)	123	60.4
机组台数×单机容量 (MW)	4×125	5×100
年发电量 (亿 kW·h)	13.2	15.16
输电电压 (kV)	220	220; 110
高压配电装置型式	GIS	GIS
开工/发电/竣工年份	1978/1987/1988	1981/1990/1993
设计单位	中南勘测设计院	长江水利委员会
施工单位	水利电力部第八工程局	武警部队水电二总队
电站名称	柘 溪	潘 家 口
建设地点	湖南 安化	河北 迁西
所在河流	资 水	滦 河
坝址以上流域面积 (km ²)	22640	33700
多年平均流量 (m ³ /s)	587	上库: 77.8 下库:
设计/校核洪水标准 (p)	0.5%/0.1%	0.1%/0.02% 2%/0.2%
设计/校核洪水流量 (m ³ /s)	16500/20400	40400/54500 10000/28000
正常蓄水位/死水位 (m)	169.5/144	222/180 144/139
总库容 (亿 m ³)	35.65	29.3 0.3168
水库调节性能	不完全年调节	多年调节
主坝坝型	大头坝	宽缝重力坝 混凝土闸坝
最大坝高/坝顶高程 (m)	104/174	107.5/230.5 28.5/151.5
主要泄洪设施	表孔 9—12×9	表孔 表孔 18—15×15 20—12×10.5 底孔 4—4×6 另有无闸溢流 堰长 399 m
设计/最大/最小水头 (m)	60/74/46.8	63.5/85/36
厂房型式	岸边式	坝后式
水轮机型式	混流式	混流式; 可逆式
水轮机转轮直径 (m)	4.1	常规水轮机 5.5; 水泵水轮机 5.53
装机容量 (MW)	447.5	420
保证出力 (MW)	112.7	
机组台数×单机容量 (MW)	1×72.5+5×75	常规 1×150; 可逆式 3×90
年发电量 (亿 kW·h)	21.74	5.64(其中天然径流发电量 3.56 亿 kW·h)
输电电压 (kV)	220; 110	220
高压配电装置型式	屋外式	屋外式
开工/发电/竣工年份	1958/1962/1975	1975/1981/1992
设计单位	中南勘测设计院	天津勘测设计院
施工单位	柘溪水电工程局	武警水电一支队

续表

电站名称	盐 锅 峡	云 峰
建设地点	甘肃 永靖	吉林 集安 朝鲜 慈江道满浦郡
所在河流	黄 河	鸭 绿 江
坝址以上流域面积 (km ²)	182704	17572
多年平均流量 (m ³ /s)	867	278
设计/校核洪水标准 (p)	0.5%/0.1%	0.1%/0.01%
设计/校核洪水流量 (m ³ /s)	7020/7500	21100/27100
正常蓄水位/死水位 (m)	1619/1618.5	318.75/281.75
总库容 (亿 m ³)	0.865	39.1
水库调节性能	日调节	不完全多年调节
主坝坝型	宽缝重力坝	宽缝重力坝
最大坝高/坝顶高程 (m)	55/1624.2	113.75/321.75
主要泄洪设施	表孔 6—12×10.5	表孔 21—11×7.5 中孔 4— ϕ 5.3
设计/最大/最小水头 (m)	38/39.5/28	89/113.5/68.6
厂房型式	坝后式	岸边式
水轮机型式	混流式	混流式
水轮机转轮直径 (m)	4.1	3.8; 4.1
装机容量 (MW)	402	400/2
保证出力 (MW)	178	150/2
机组台数×单机容量 (MW)	3×44+6×45	(4×100) /2
年发电量 (亿 kW·h)	20.8	17.5/2
输电电压 (kV)	110	220
高压配电装置型式	屋外式	屋外式
开工/发电/竣工年份	1958/1961/1975*	1959/1965/1967
设计单位	西北勘测设计院	朝鲜重工业委员会第一设计所 (大坝设计) 中国东北勘测设计院 (厂房设计)
施工单位	水利电力部第四工程局	朝鲜第一建设事务所 (大坝施工) 中国云峰水电工程局 (厂房施工)
电站名称	大 化	凤 滩
建设地点	广西 马山	湖南 沅陵
所在河流	红 水 河	酉 水
坝址以上流域面积 (km ²)	112200	17500
多年平均流量 (m ³ /s)	1990	504
设计/校核洪水标准 (p)	1%/0.1%	0.1%/0.02%
设计/校核洪水流量 (m ³ /s)	23200/31000	29400/34800
正常蓄水位/死水位 (m)	155/153	205/170
总库容 (亿 m ³)	9.64	17.33
水库调节性能	日调节	季调节
主坝坝型	空腹重力坝	空腹重力坝
最大坝高/坝顶高程 (m)	74.5/174.5	112.5/211.5
主要泄洪设施	表孔 13—14×14	表孔 13—14×12 放空孔 1—6×7
设计/最大/最小水头 (m)	22/39.2/13	73/91/54
厂房型式	河床式	坝内式
水轮机型式	转桨式	混流式
水轮机转轮直径 (m)	8.5	4.1
装机容量 (MW)	400	400
保证出力 (MW)	106.8	93.5
机组台数×单机容量 (MW)	4×100	4×100
年发电量 (亿 kW·h)	21.05	20.121
输电电压 (kV)	220; 110	220; 110
高压配电装置型式	屋外式	屋外式
开工/发电/竣工年份	1975/1983/1986	1970/1978/1979
设计单位	广西壮族自治区电力工业局勘测设计院	湖南省水利水电勘测设计院
施工单位	大化水电工程指挥部	水利电力部第八工程局 湖南省水电工程局

* 扩建的9号机于1990年投入。

续表

电站名称 建设地点 所在河流 坝址以上流域面积 (km ²) 多年平均流量 (m ³ /s) 设计/校核洪水标准 (p) 设计/校核洪水流量 (m ³ /s) 正常蓄水位/死水位 (m) 总库容 (亿 m ³) 水库调节性能 主坝坝型 最大坝高/坝顶高程 (m) 主要泄洪设施 设计/最大/最小水头 (m) 厂房型式 水轮机型式 水轮机转轮直径 (m) 装机容量 (MW) 保证出力 (MW) 机组台数×单机容量 (MW) 年发电量 (亿 kW·h) 输电电压 (kV) 高压配电装置型式 开工/发电/竣工年份 设计单位 施工单位	三门峡 河南 三门峡 山西 平陆 黄河 688400 1344 0.1%/0.01% 40000/52500 325/300 重力坝 106/353 泄洪排沙洞 2—9×12 深孔 12—3×8 底孔 10—3×8 30/52/15 坝后式 转桨式；混流式 6.0；5.5 400 5×50+2×75 13.17 220； 110 屋外式 1957/1973/… 苏联列宁格勒水电设计院 天津勘测设计院修改设计 水利电力部第十一工程局	渭 源 吉林 集安 朝鲜 慈江道渭源郡 鸭 绿 江 31602 407 0.2%/0.02% 30500/40200 164/150 6.26 季调节 重力坝 55/171 表孔 18—12×13 39/42/25 坝后式 混流式 5.0 390/2 50/2 (6×65) /2 12/2 220； 66 屋外式 1980/1987/1988 朝鲜电力工业委员会平壤设计院 朝鲜负责施工
电站名称 建设地点 所在河流 坝址以上流域面积 (km ²) 年平均流量 (m ³ /s) 设计/校核洪水标准 (p) 设计/校核洪水流量 (m ³ /s) 正常蓄水位/死水位 (m) 总库容 (亿 m ³) 水库调节性能 主坝坝型 最大坝高/坝顶高程 (m) 主要泄洪设施 设计/最大/最小水头 (m) 厂房型式 水轮机型式 水轮机转轮直径 (m) 装机容量 (MW) 保证出力 (MW) 机组台数×单机容量 (MW) 年发电量 (亿 kW·h) 输电电压 (kV) 高压配电装置型式 开工/发电/竣工年份 设计单位 施工单位	新 丰 江 广东 河源 新 丰 江 5740 208 0.1%/0.01% 10300/12700 116/93 138.96 多年调节 大头坝 105/124 溢洪道 3—15×10 泄洪洞 1—φ10 73/81/58 坝后式 混流式 4.1 302.5 99.9 3×72.5+1×85 9.9 220； 110 屋外式 1958/1960/1962 广东省水利电力勘测设计院 新丰江水电工程局	碧 口 甘肃 文县 白 龙 江 26000 286 0.2%/0.02% 7630/9950 704/685 5.21 季调节 壤土心墙土石坝 101.8/710 溢洪道 1—15×16 泄洪洞 1—φ10.5 泄洪洞 1—13×11.5 排沙孔 1—φ4.4 73/86.2/57.5 岸边式 混流式 4.1 300 78 3×100 14.63 220； 110 屋外式 1969/1976/1977 西北勘测设计院 水利电力部第五工程局

续表

电站名称	沙 溪 口	紫 水 滩
建设地点	福建 南平	浙江 云和
所在河流	沙 溪 溪	龙 泉 溪
坝址以上流域面积 (km ²)	25562	2761
多年平均流量 (m ³ /s)	778	100
设计/校核洪水标准 (p)	1%/0.1%	0.1%/0.01%
设计/校核洪水流量 (m ³ /s)	20300/26300	11700/14900
正常蓄水位/死水位 (m)	88/82	184/164
总库容 (亿 m ³)		13.9
水库调节性能	日调节	年调节
主坝坝型	重力坝	双曲拱坝
最大坝高/坝顶高程 (m)	40/93	102/194
主要泄洪设施	表孔 16—17×14.8	表孔 2—8.6×13.91 中孔 2—7.5×11.68
设计/最大/最小水头 (m)	17.5/24/7	69/85/60.5
厂房型式	河床式	坝后式
水轮机型式	转桨式	混流式
水轮机转轮直径 (m)	8.0	3.0
装机容量 (MW)	300	300
保证出力 (MW)	50	30.3
机组台数×单机容量 (MW)	4×75	6×50
年发电量 (亿 kW·h)	9.6	4.9
输电电压 (kV)	110; 220	220; 110
高压配电装置型式	屋外式	屋外式
开工/发电/竣工年份	1983/1987/1990	1981/1986/1988
设计单位	华东勘测设计院	华东勘测设计院
施工单位	闽江水电工程局	水利电力部第十二工程局
电站名称	富 春 江	青 铜 峡
建设地点	浙江 桐庐	宁夏 青铜峡
所在河流	富 春 江	黄 河
坝址以上流域面积 (km ²)	31645	275000
多年平均流量 (m ³ /s)	1000	1028
设计/校核洪水标准 (p)	1%/0.1%	1%/0.1%
设计/校核洪水流量 (m ³ /s)	23100/33800	7500/9280
正常蓄水位/死水位 (m)	23/21.5	1156/1155.5
总库容 (亿 m ³)	8.83	0.56
水库调节性能	日调节	日调节
主坝坝型	重力坝	闸 坝
最大坝高/坝顶高程 (m)	47.7/32.2	42.7/1160.2
主要泄洪设施	表孔 17—14×13	溢洪道 2—14×8; 5—14×7.5 泄洪闸 3—10×5.5 排沙孔 14—6.5×1.5 排沙孔 1—4×2
设计/最大/最小水头 (m)	14.3/17.7/6.4	18/21/16.4
厂房型式	河床式	闸墩式
水轮机型式	转桨式	转桨式
水轮机转轮直径 (m)	8.0	5.5; 5.0
装机容量 (MW)	297.2	272
保证出力 (MW)	51	87.6
机组台数×单机容量 (MW)	1×57.2+4×60	7×36+1×20
年发电量 (亿 kW·h)	9.23	13.5
输电电压 (kV)	220; 110	110
高压配电装置型式	屋外式	屋外式
开工/发电/竣工年份	1958/1968/1977	1958/1967/1978
设计单位	上海勘测设计院	西北勘测设计院
施工单位	水利电力部第十二工程局	水利电力部第三工程局

注：1. 表内主要泄洪设施栏的数字表示：对闸孔为孔数—宽 (m) ×高 (m)；对隧洞为条数—洞径 (m) 或条数—宽 (m) ×高 (m)。
2. 水丰、云峰、渭源3座水电站系中朝两国共有，属于中国的电站容量、保证出力、年发电量均按一半计算。
3. GIS 即 gas insulated switchgear，气体绝缘金属封闭电器。

式和定桨式),使用的最高水头为78 m,转轮直径1.8 m,单机容量12.5 MW,装于陕西省汉江支流褒河上的石门水电站。使用贯流式机组的1座,是湖南省资水上的马迹塘水电站,额定水头3.55 m,最大水头8.5 m,最小水头2.8 m,转轮直径6.3 m,单机容量18.5 MW。

水电站最高交流出线电压为500 kV,首先用于葛洲坝水利枢纽,为了把电能送往华东,还架设了1条±500 kV的直流输电线路,全长1000 km,送电1200 MW。龙羊峡水电站、刘家峡水电站和安康水电站用交流330 kV送电。

高压开关站以屋外式为主。龙羊峡、安康、乌江渡、鲁布革、东江、万安等水电站使用气体绝缘金属封闭电器,电压为330 kV和220 kV。电气主接线主要有双母线接线、单母线接线、角形接线、桥形接线等类型,葛洲坝水利枢纽大江电厂的500 kV侧的主接线是一个半断路器接线。

简要历史 日本帝国主义侵占中国东北时期,于1937年动工兴建水丰(鸭绿江上),丰满(第二松花江上)和镜泊湖(牡丹江上)等3座水电站。1945年8月15日抗日战争胜利时,丰满装机4台($2\times 60\text{ MW}+2\times 65\text{ MW}$),水丰装机3台($3\times 90\text{ MW}$),镜泊湖已竣工($2\times 18\text{ MW}$)。此后直到1949年9月,中国的大中型水电站再也没有新的建设,丰满、水丰和镜泊湖等3座水电站反而遭到不同程度的破坏。那时,水丰水电站由朝鲜管理,中国的水电装机容量只有161 MW。1949年中华人民共和国建立后,中国的大中型水电站建设迅速发展。1954年11月5日佛子岭水库水电站($2\times 1\text{ MW}+3\times 3\text{ MW}+2\times 10\text{ MW}$)第一台机组发电。这是1949年10月以后,中国投入电力系统运行的第一座中型水电站。永定河上的官厅水电站($3\times 10\text{ MW}$)于1955年12月27日第一台机组发电,中国设计、制造的混流式机组单机容量达到了10 MW。1960年4月新安江水电站($5\times 72.5\text{ MW}+4\times 75\text{ MW}$)第一台机组发电,中国水电建设又上了一个新台阶。1969年4月刘家峡水电站($3\times 225\text{ MW}+1\times 250\text{ MW}+1\times 300\text{ MW}$)第一台机组发电,标志着中国可以自行设计、施工、制造设备和安装百万千瓦以上的大型水电站了。1981年11月葛洲坝水利枢纽($2\times 170\text{ MW}+19\times 125\text{ MW}$)第一台机组发电,1987年11月龙羊峡水电站($4\times 320\text{ MW}$)第一台机组发电,中国水电建设进入了一个新的历史时期。现正修建和计划修建一大批大型水电站。已开工和即将开工的有二滩水电站($6\times 550\text{ MW}$),李家峡水电站($5\times 400\text{ MW}$),龙滩水电站($9\times 600\text{ MW}$),广州抽水蓄能电站(一期 $4\times 300\text{ MW}$;二期 $4\times 300\text{ MW}$),天荒坪抽水蓄能电站(6×300

MW),水口水电站($7\times 200\text{ MW}$),大朝山水电站($6\times 225\text{ MW}$),天生桥一级水电站($4\times 300\text{ MW}$),天生桥二级水电站($6\times 220\text{ MW}$),漫湾水电站($5\times 250\text{ MW}$),岩滩水电站($4\times 302.5\text{ MW}$),隔河岩水电站($4\times 300\text{ MW}$),五强溪水电站($5\times 240\text{ MW}$),宝珠寺水电站($4\times 175\text{ MW}$),东风水电站($3\times 170\text{ MW}$),铜街子水电站($4\times 150\text{ MW}$),十三陵抽水蓄能电站($4\times 200\text{ MW}$)等。关于长江三峡水利枢纽($26\times 700\text{ MW}$),1992年4月,第七届全国人民代表大会第五次会议审议通过了《关于兴建长江三峡工程的决议》,其枢纽工程的初步设计报告已于1993年7月27日经国务院审查批准,正式进入施工准备阶段。这批水电站的兴建,标志着中国水电建设迈入了世界水电建设的前列。其中有240 m高的双曲拱坝(二滩)、178 m高的面板堆石坝(天生桥一级)、万吨级过坝设施和700 MW单机容量的水轮发电机组(三峡)。

(杨德晔)

Zhongguo zaoqi shuidianzhan

中国早期水电站 (earlier hydropower stations in China)

中国在20世纪20年代及以前动工兴建的水电站。1904年7月,在台湾省淡水河支流新店溪上修建的龟山水电站,装机容量500 kW,是中国境内最早出现的水电站。此后,在台湾又陆续建成了初坑(新店溪,1908年8月)、后里(大安溪,1910年7月)、竹门子(荖浓溪,1909年9月)、北山坑(乌溪,1921年10月)和浊水(浊水溪,1923年1月)等一批小型水电站,其装机容量都不超过5000 kW。大陆兴建的第一座水电站是云南省昆明附近的石龙坝水电站。它的第一厂于1910年动工,1912年投产,后经几次扩建,中华人民共和国成立前装机容量达到2920 kW。四川省泸县洞窝水电站于1923年动工,1925年投产140 kW,1938年又投产240 kW。西藏夺底水电站于1925年动工,1927年建成,装机80 kW。这一时期,福建省和四川省还修建了5座水电站,即:1926年建成的南平县夏道水电站(3 kW);1928年建成的占田县平湖水电站(24 kW);1928年开工,1930年建成的顺昌县顺昌水电站(16 kW)和南平县西芹水电站(132 kW,1937年改名为南平水电厂);1926年建成的成都市南洗面桥水电站(10 kW)。上述这些水电站大都是利用天然径流的引水式水电站,有简单的闸坝、渠道和厂房,建筑物就地取材,采用块石浆砌。

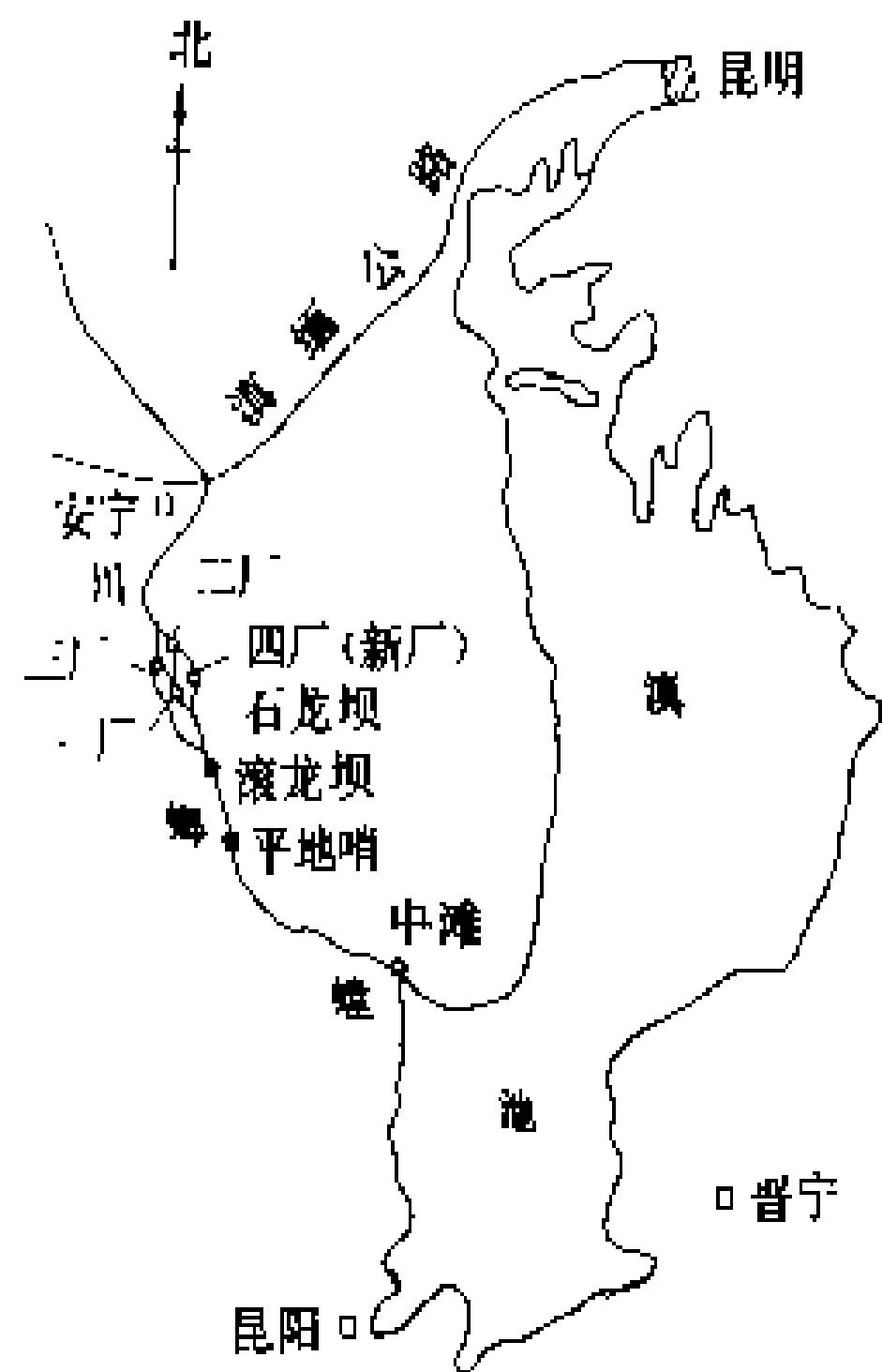
石龙坝水电站 位于云南省昆明市西南约40 km的螳螂川上。第一厂于1910年7月(清宣统二年)动工。系清劝业道刘苓舫倡议,昆明商会集资筹办的。商会总理王筱斋任董事长,左益轩任工程现场负责人,聘

请两名德国工程师担任技术指导。

螳螂川全长 94 km, 自滇池出口流经平地哨、滚龙坝至石龙坝, 长 13 km, 落差 42 m。在中滩处建闸, 引水发电, 见图。浆砌条石引水渠, 全长 1478 m, 利用水头 15 m。安装 240 kW 单机双尾混流式水轮发电机组 2 台。1912 年 4 月竣工, 以交流 23kV 输电线经 35 km 送电昆明。

1924 年动工修建第二厂, 落差 16 m, 安装 276 kW 机组 2 台, 448 kW 机组 1 台, 1926 年建成。

1934 年在平地哨修建拦河闸, 利用自中滩以下沿螳螂川 9 km 河道的槽蓄容积 20 万 m³, 作为日调节水库。1937 年建成第三厂, 利用落差 16 m, 安装 720 kW 机



螳螂川水电开发示意图

组 2 台。至此, 3 座厂房共计安装 7 台机组。总装机容量为 2920 kW。

1951 年开始筹建第四厂, 改建引水渠道, 引用 24 m³/s 流量, 利用 31 m 水头。1954 年底第一台 3000 kW 水轮发电机组投产。1958 年 6 月第二台 3000 kW 机组投产。全厂装机 6000 kW 取代了原有 7 台小机组。(参见彩图插页第 12 页 18 图)

洞窝水电站 原名济和水电厂, 位于泸州市龙溪河上, 是四川省境内最早修建的水电厂。由川南道尹公署工程师税西恒等 15 人发起募股集资, 税西恒负责筹备并担任技术指导, 于 1923 年动工, 1925 年 2 月建成送电泸州市。

泸州市龙溪河是长江北岸的一条小支流, 发源于永川县登来山, 全长 76.3 km, 在泸州市内注入长江。电厂位于河口以上 2 km 处, 利用瀑布得落差 44 m。拦河坝建于洞窝, 坝址以上流域面积 518 km²。坝体用条石砌筑, 圆弧形, 弧长 80 m, 高 2.5 m, 库容 46 万 m³, 引水渠长 230 m, 输水钢管直径 0.6 m, 安装 1 台 140 kW 水轮发电机组, 手动式调速器, 同轴励磁机。

1935 年开始扩建, 加宽并延伸引水渠道。在距原压力水管 10m 处凿直径 1.2 m 的隧洞进入厂房, 安装 1 台容量为 240 kW 的机组, 1938 年底建成发电。

1939 年, 23 兵工厂购买济和水电厂资产后, 改名为洞窝水电站。1941 年着手扩建, 向美国订购单机容

量为 500 kW 的混流式水轮发电机组 2 台, 1947 年拆除原 240 kW 机组, 准备安装新机, 未能完成。泸州市解放后, 于 1950 年继续扩建, 5 月 1 日第一台 500 kW 机组发电。1952 年第二台 500 kW 机组投产。1953 年原 140 kW 机组停运, 拆除调出。以后, 坝加高 1 m, 库容 71 万 m³, 加装 1250 kW 机组 1 台, 总容量达 2250 kW。

夺底水电站 西藏第一座水电站, 位于拉萨河的支流夺底沟上, 1925 年由藏族中层贵族子弟强俄巴·仁增多吉勘测设计并组织施工, 1927 年动工, 1928 年建成发电。

夺底沟发源于盘山口以西, 海拔 5500 m, 上游分东、中、西 3 条支沟, 在林重汇合, 流向夺底水电站进水口, 长约 3800 m, 落差 316 m, 平均坡降 83‰。电站为引水式, 无拦河坝, 前池容积 200 m³。自前池至厂房用 350 m 管道连接, 其中 330 m 为木管, 20 m 为钢管。厂房采用木石结构, 安装一台 80 kW 水轮发电机组, 经 4 km 送电给藏币厂, 供照明及动力用电。1931 年又架设 7.5 km 输电线路向拉萨供电。1944 年因机组失修停止发电。

1954 年西藏军区协助修复, 于 1955 年春恢复发电。但因设备陈旧只发电 40 kW 供照明之用。年底进行改建, 筑坝蓄水、开山修渠, 增加库容达 10 万 m³。坝高 5 m, 渠长 2100 m, 利用水头 132 m, 安装 220 kW 机组 3 台, 总容量 660 kW, 1956 年 12 月 1 日正式发电。

(陆茂竹)

zhongyang kongzhishi

中央控制室 (central control room) 对水电站进行集中监视、控制的场所。对于遥控的水电站或无经常值班人员的水电站, 可以不设中央控制室或设简易的控制室。但对于靠运行人员在当地进行集中监视、控制的水电站, 中央控制室就成为电站运行管理的中枢, 它应配备有对电站主设备进行监视、控制的器具、仪表和指示信号, 同时还应配备有相应的通信设施, 以便与上级调度所联系和进行厂内运行调度。控制室要为值班人员提供良好的设备条件和工作环境, 特别是大型电站的中央控制室, 其面积、设备配置和布置、室内装修、照明、温度和湿度等都应从生产上、生理上和心理上为值班人员创造良好的条件。一般要求是: ①位置适中, 离机组及高压配电装置等主要设备较近, 便于通往主机室、主变压器室及开关站等主要生产场所; 尽量避免振动和噪声的干扰; 适当兼顾采光、通风等的自然条件。②设备配置要以满足集中监控为原则, 宜精不宜繁; 次要的、辅助性设施一般都在现地自

zhong

成独立子系统,可以现地自动或手动操作,而将必要的信息引至中央控制室;控制室内一般都设控制台和模拟屏,其结构形式各有差异,但屏、台上的设备都应根据其用途、重要性、使用的频繁度等有区别地布置在值班员监视、操作范围之内,布置要清晰、有条理、对象明确、模拟性强,使用方便,不易误操作和误判断。③应有一个舒适的、使值班人员能精神集中、不易疲劳的环境,能清醒而准确地进行操作和监视,能对运行中出现的异常情况作出迅速、准确的判断和处理。

20 世纪 60 年代以前,水电站控制室一般都是用直立屏或控制屏台,值班人员站在屏前进行操作,监视、控制条件比较差。其后就逐渐改进为控制台和模拟屏的配置方式,采用小型化操作器具和仪表,值班人员坐在控制台前即可对电站的运行进行全面监视和操纵,大大改善运行值班条件,因而国内、外都得到普遍应用。中国于 1964 年在官厅水电站应用弱电选线式控制台、模拟屏的集中控制方式,获得良好的效果,成为中国第一个正式采用这种控制方式的电站;1969 年投入运行的刘家峡水电站首次采用强电(直流 220V)小型化一对一的集中控制方式,亦获得成功;自此之后,中央控制室采用控制台、模拟屏集中控制装置成了水电站的基本配置方式。随着水电站计算机监控系统的应用,自动监视和控制的功能大大加强,提高了水电站运行的安全性、经济性和供电质量,减轻了值班人员的工作负担;监控系统所配置的屏幕显示器、功能键盘和打印机等设备,为值班人员提供灵活、方便的人机联系手段,这些设备的应用使中央控制室有较大的改观。(参见彩图插页第 27 页 51 图)

(梁见诚)

zhongliba

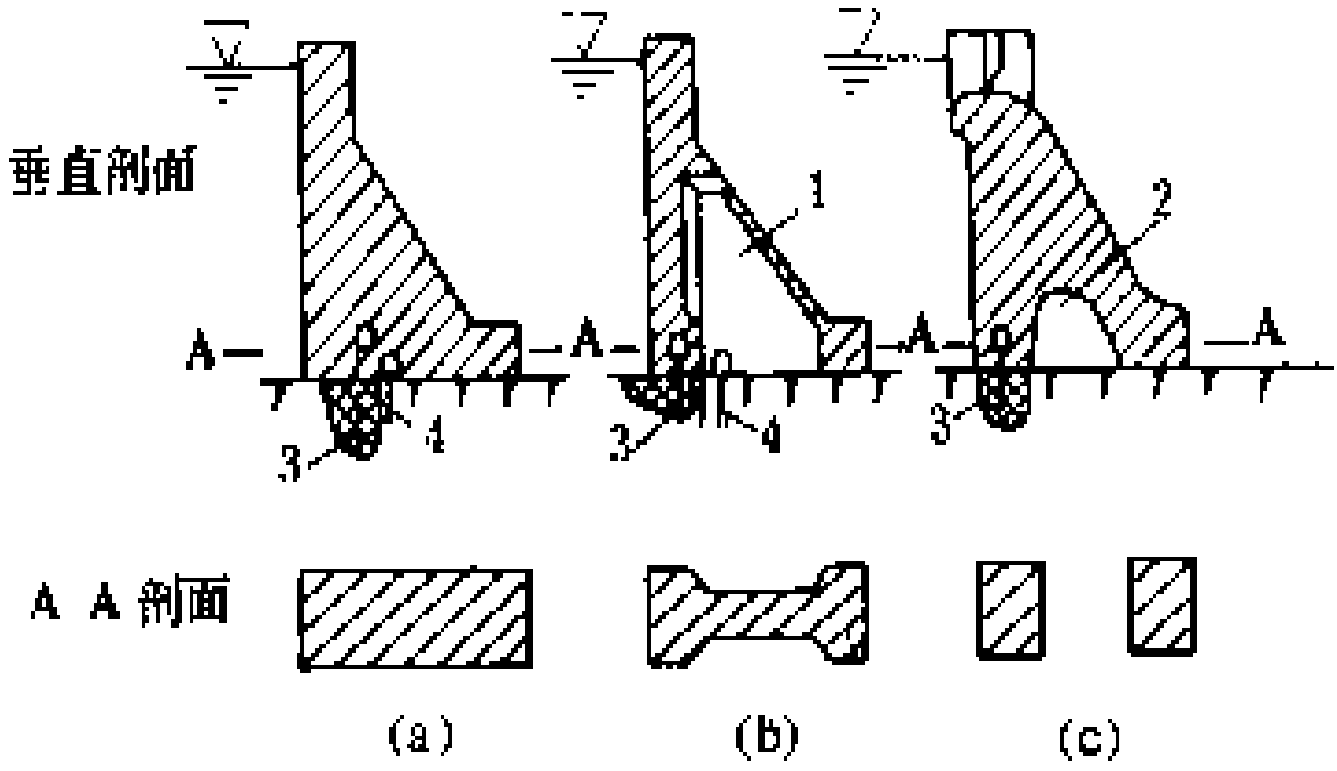
重力坝 (gravity dam) 主要依靠自身重量抵抗外力作用以保持稳定的混凝土坝或砌石坝。坝体基本剖面呈三角形,顶点多在坝顶附近,坝底宽与坝高之比一般在 0.7~0.9 之间。重力坝的坝轴线在平面上一般呈直线形,有时根据地形、地质条件和工程布置要求,设计成折线形或曲线形。重力坝沿坝轴线多设有横缝,其间距多为 15~20 m。二横缝之间的坝体称为坝段。大多数重力坝建于基岩上。当坝高在 40 余米以下时,也可建于非岩基上。重力坝的主要优点有:①结构受力条件较明确,安全可靠,其失效概率较土石坝和支墩坝为低。②能较好地适应各种地质、地形条件。③设计和施工都较简单。④便于布置泄洪、导流和引水发电等建筑物。⑤对混凝土的强度要求较低,便于施工机械化。重力坝的主要缺点有:①坝体体积大,需要耗用大量水泥。②建筑材料的强度未能充分得到利用。③大体

积混凝土的温度控制措施较为复杂。

类型 重力坝的类型可按坝段间横缝的构造、坝体结构型式和坝段是否设有溢流堰划分如下。

(1) 按坝段间横缝的构造可分为悬臂式、铰接式和整体式三类。①横缝为不灌浆的平缝时为悬臂式重力坝,其各个坝段均独立工作。②横缝处设键槽,但不进行灌浆的为铰接式重力坝,坝段之间可以传递力,但不传递力矩,如美国的海华西(Hiwassee)重力坝。③横缝间设键槽并进行灌浆的为整体式重力坝,坝段间可以传递力和力矩,如苏联的库尔普萨依(Курпсай)重力坝。在工程实践中多采用悬臂式和整体式重力坝,铰接式的则很少采用。

(2) 按坝体结构型式分为实体重力坝、宽缝重力坝和空腹重力坝,见图所示。①实体重力坝坝体内无空腔,其上游坝坡多为垂直,有时下部设 1:0.2 左右的折坡,其下游坝坡一般为 1:0.7~1:0.8。②宽缝重力坝系将坝段间的横缝扩宽,在坝体内形成顺水流方向的空腔,以利坝基排水和减少坝体工程量。空腔的宽度通常为坝段宽度的 20%~40%。宽缝重力坝上游坝坡较缓。中国的新安江水电站为宽缝重力坝。③空腹重力坝见空腹坝。



重力坝坝型剖面图

(a) 实体重力坝; (b) 宽缝重力坝; (c) 空腹重力坝

1—宽缝; 2—空腔; 3 帷幕; 4 排水幕

(3) 按照坝段是否设溢流堰分为溢流坝和非溢流坝。非溢流坝除单纯挡水外,有时又可为设有中孔、深孔、底孔的坝段或设导流底孔的坝段(见坝身泄水孔)和设进水口的坝段等。当在设进水口的坝段坝趾下游设有水电站厂房时,这种坝段又称厂房坝段(见坝后厂房)。

坝体构造 非溢流坝的坝顶宽度和溢流坝的坝顶工作桥、交通桥宽度应根据设备布置、运行操作、检修、交通、观测以及防洪抢险等要求确定。为了防渗和降低扬压力,在坝体内设置止水和排水系统,在坝基设置帷幕和排水幕。排水幕设于帷幕下游,由在坝基中钻设的排水孔幕构成。坝段间设止水。常用的止水片有塑料止水片、橡胶止水片和铜止水片。为满足帷幕灌浆、纵(横)缝灌浆(见接缝灌浆)、排水、交通、观测、维护

以及施工期坝体冷却、坝内通风、闸门操作等方面的要求,在坝体内设置由纵、横向廊道和竖井等组成的廊道系统。通常在靠近上游坝踵处设有基础灌浆廊道,兼作排水、检查等用。

坝体断面应根据稳定、应力和布置及经济等要求确定。为了保证重力坝的稳定,应使重力坝不会沿坝内任一水平截面或沿坝和坝基接触面发生滑动或倾覆破坏,也不会沿坝基内软弱结构面发生滑动破坏(见坝基稳定)。坝体和坝基内任一点的应力均不许超过它们的允许应力;在正常情况下,坝踵处不产生拉应力。

(1) 抗滑稳定计算。主要核算坝基面上的滑动条件,有时需核算坝体层面及坝基内软弱层面的抗滑稳定条件。通常采用刚体极限平衡法,计算公式有两种:

①抗剪断计算公式: $K' = \frac{f' \Sigma W + c' A}{\Sigma H}$, 式中 K' 为按

抗剪断计算的抗滑稳定安全系数; f' 和 c' 分别为抗剪断摩擦系数和抗剪断凝聚力; ΣW 为作用于滑动面上的法向分力(包括扬压力); ΣH 为作用于滑动面上的切向分力; A 为滑动面面积。②纯摩计算公式: $K =$

$\frac{f \Sigma W}{\Sigma H}$, 式中 K 为按纯摩计算的抗滑稳定安全系数; f

为抗剪摩擦系数。美国、日本、印度等国多采用抗剪断计算公式。中国 SDJ21-78《混凝土重力坝设计规范》(试行)及其补充规定,对高坝采用抗剪断计算公式;对中、低坝可采用两种公式之一进行计算。各国对 f' 、 c' 的取值不同,要求的 K' 值也不同。中国 SDJ21-78 规定, f' 和 c' 值应以野外试验测定的峰值的小值平均值为基础,结合实际情况,参照类似工程经验并考虑工程处理效果,经综合分析后确定。

(2) 应力分析。通常采用材料力学法进行悬臂梁式重力坝的应力分析。对于重要的高坝,也采用有限元法、有限差分法进行计算。对于地形地质条件复杂的重力坝,除采用有限元法等进行坝体与坝基的应力分析外,还通过结构模型试验和岩体地质力学模型试验等确定其应力状态。对于整体式重力坝,则多采用分载法或三维有限元法进行应力分析。现已编有多种重力坝应力和稳定分析计算程序和坝体优化程序,供设计采用。

发展简史 早期的重力坝用石料砌筑,坝体断面肥大,多呈梯形或矩形。秦始皇 28 年(公元前 219 年)在今广西兴安县建成了著名的灵渠,渠上建有高 3.9 m 的干砌石溢流堰,迄今已运行二千多年,为世界上现存最古老的重力坝之一。现代重力坝设计理论是从 1850 年以后发展起来的。进入 20 世纪后,混凝土重力坝开始迅速发展。美国 1916 年建成坝高 106 m 的箭石(Arrow Rock)重力坝,1935 年建成坝高 221.4m 的

胡佛(Hoover)拱形重力坝,1962 年瑞士建成大狄克逊(Grand Dixence)重力坝,坝高 285 m,迄今仍是世界上最高的重力坝。中国最高的重力坝是贵州省的乌江渡拱形重力坝,坝高 165 m 和甘肃省黄河上游的刘家峡重力坝,坝高 147 m。

参考书目

潘家铮. 重力坝的设计与计算. 北京: 水利电力出版社, 1989

(郑顺炜)

zhouliushi shuilunji

轴流式水轮机 (axial flow turbine) 水

流由轴向进入转轮,沿其叶片自轴向流出,将水流能量转换为机械能的反击式水轮机。按其转轮叶片能否转动又分为轴流转桨式和轴流定桨式。轴流式水轮机的使用水头范围一般为 3~80 m。

结构及其特点 轴流式水轮机的结构比较复杂,主要部件包括蜗壳、座环、顶盖、导水机构、转轮室、转轮、底环、尾水管、主轴(见水轮机主轴)、导轴承(见水轮机导轴承)等,见图 1,图中同时标示出水流流向。

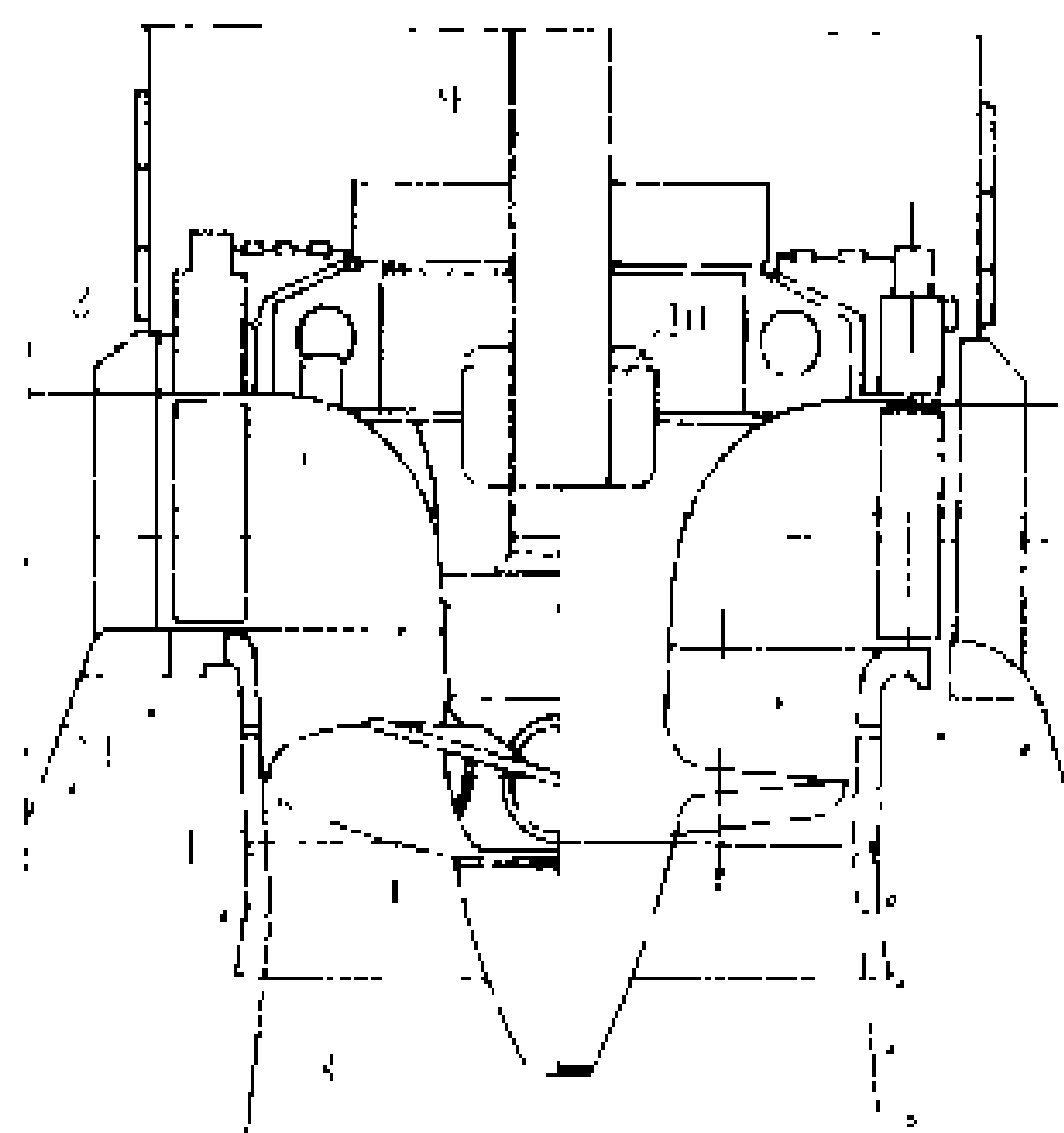


图 1 轴流式水轮机结构图

- 1—蜗壳; 2—座环; 3—顶盖; 4—导水机构; 5—转轮室;
6—底环; 7—转轮; 8—尾水管; 9—主轴; 10—导轴承;
11—转轮叶片

轴流式水轮机的蜗壳一般为混凝土浇筑型,水头较高时,亦用钢制蜗壳。混凝土蜗壳是直接在厂房水下部分大体积混凝土中浇筑成的蜗形空腔,断面形状一般为“T”形或“Γ”形,钢制蜗壳的断面为圆形。转轮室分为中环和下环两个部分。

轴流式水轮机的转轮包括转轮体(亦称轮毂)和叶片。定桨式转轮叶片按一定角度固定于转轮体上;转桨式则在转轮体内设有一套使叶片转动的操作和传动机构。转轮体有圆柱形和球形两种。转轮叶片的数目一般

为4~6个,小型低水头水轮机也有采用3个叶片的。轴流转桨式水轮机具有双调节性能,即导水叶及转轮叶片均可调节,而定桨式则只能调节导水叶。因而,轴流转桨式水轮机能在水头和负荷变化较大范围内保持水轮机的运行稳定性和高效率,从而比定桨式应用得更为广泛。

发展简史及趋势 1912年,捷克人V.卡普兰(V. Kaplan)提出一种带外轮缘,叶片固定的轴流式水轮机,如图2所示,经过多年的逐步完善,发展成为现代的轴流转桨式水轮机,亦称卡普兰式水轮机。

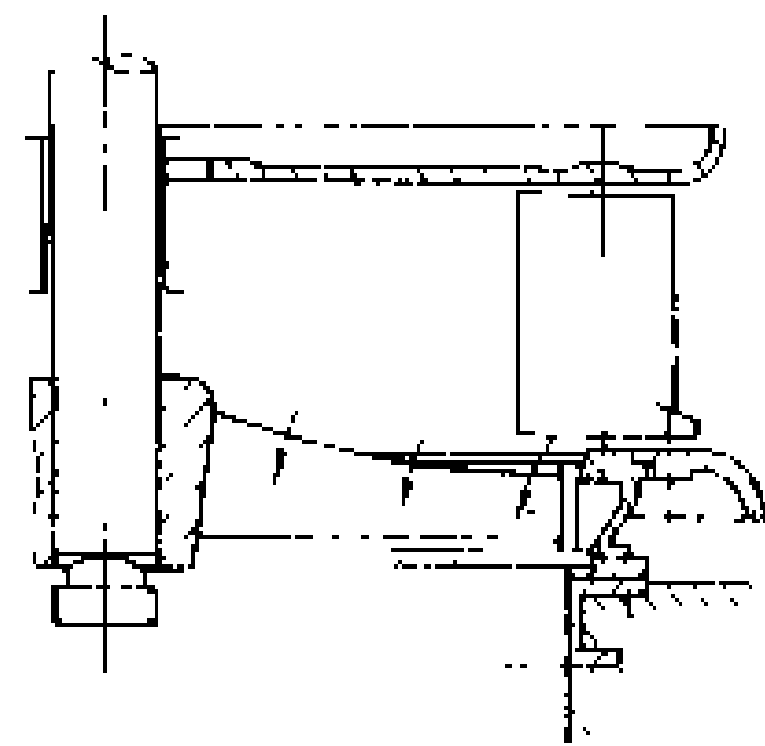


图2 具有外轮缘的轴流式水轮机

近年来,轴流式水轮机的应用不断向高水头、大尺寸发展。目前,使用水头已达80 m以上,单机容量及转轮尺寸都趋向增长。当前世界上使用水头最大的大型轴流转桨式水轮机是意大利的那门比亚(Nembia)水电站,最大水头为88 m;单机出力最大的是苏联的舒尔宾水电站(Шульбинская ГЭС),额定出力为230 MW;最大的轴流定桨式水轮机安装在尼日利亚的凯因齐电站,单机额定出力135 MW(最大出力139.7 MW),转轮直径8.54 m。中国的轴流式水轮机的设计制造技术也发展很快,已建成的葛洲坝水电站(见葛洲坝水利枢纽)安装

的两种轴流转桨式水轮机最大水头为27 m,单机额定出力分别为175 MW(共2台)和129 MW(共19台),转轮直径分别为11.3 m和10.2 m,前者为目前世界上同类水轮机中转轮直径最大的。安装在水口水电站的轴流转桨式水轮机,其最大水头为58 m,单机额定出力为204 MW,转轮直径为8 m。

(史毓珍)

Zhujiang shuixi shuinneng ziyuan

珠江水系水能资源 [hydropower resources of Zhujiang (Pearl) river system]

据1980年《中华人民共和国水力资源普查成果》统计,珠江水系水能资源理论蕴藏量为2933.2亿kW·h/a,其中可能开发资源(见水能资源)1124.78亿kW·h/a。珠江水系水能资源占中国的6%,列长江、雅鲁藏布江、澜沧江和黄河水系之后,位于第5位。水系内部水能资源分布很不均匀,其中西江干支流占很大比重。西江干支流理论蕴藏量2578.41亿kW·h/a,占水系的88%;可能开发资源993.45亿kW·h/a,也占水系的88%。北江和东江的资源合计只占12%。

珠江水系流域面积43.8万km²,地跨云南、贵州、广西、广东、湖南和江西6省(区)。珠江水系由西江、北江和东江组成,广州至虎门河段始称珠江,为西江、北江和东江的尾间,通过珠江三角洲地区注入南海,平均年径流量3412亿m³。

按地区划分,珠江水系水能资源主要分布于西部的云南、贵州和广西3省(区)。该3省(区)水能理论蕴藏量占全水系的84.2%;位于东部的广东、湖南和江西3省仅占15.8%。广西壮族自治区水能资源理论蕴藏量占全水系的48.6%,可能开发水能资源占全水系的55.5%,所占比重最大。

西江水能资源 西江为珠江水系的最大河流,发源于云南省沾益县马雄山,自西向东流经云南、贵州、广西和广东。西江干流上游称南盘江,纳北盘江后称红水河,会柳江后称黔江,会郁江后称浔江,会桂江后始称西江。干流全长2215.8 km,落差2136 m,流域面积34.05万km²,平均年径流量2460亿m³。

西江干支流落差大,径流丰沛,水能资源丰富,水能理论蕴藏量达2578.41亿kW·h/a,占珠江水系的88%。西江干流水能理论蕴藏量为944.77亿kW·h/a,占西江干支流总量的36.64%。

西江干支流可能开发的水能资源装机容量2133.5万kW,平均年发电量993.45亿kW·h,分别占珠江全水系的85.85%和88%。其中干流总装机容量为1184.40万kW,平均年发电量539.7亿kW·h,分别占西江干支流的55.51%和54.33%。

西江主要支流有北盘江、柳江、郁江和桂江,水能资源亦很丰富。各支流水能资源见表。

西江各支流水能资源表

支流名称	流域面积(km ²)	水能理论蕴藏量(亿kW·h/a)	可能开发水能资源	
			装机容量(万kW)	年平均发电量(亿kW·h)
北盘江	25830	280.91	179.43	98.34
柳江	57173	395.95	189.98	91.36
郁江	86800	311.73	203.75	96.20
桂江	19288	118.65	53.56	25.42

北江水能资源 北江发源于江西省信丰县西溪湾,上源称浈水;至广东韶关后称北江,在三水县思贤滘与西江相通,流入珠江三角洲河网区。思贤滘以上流域面积46686 km²,干流长468 km,落差305 m,多年平均年径流量483.5亿m³。

北江干流水能理论蕴藏量235.45亿kW·h/a,可能开发水能资源可装机205.39万kW,多年平均年发电量76.34亿kW·h。干流水能理论蕴藏量34.53亿kW·h/a,仅占北江水系的14.67%,可能开发水能

资源总装机容量 38 万 kW, 多年平均年发电量 12.48 亿 kW·h, 仅分别为北江干支流的 18.5% 和 16.35%。

北江干支流由于水库淹没的制约, 可能开发的水电站多数为低坝径流式水电站或高水头引水式水电站。水电站规模均属中小型。干支流装机容量 1 万 kW 及以上的可能开发水电站 49 座, 总装机容量 137.24 万 kW, 平均单站装机容量仅为 2.8 万 kW。

东江水能资源 东江发源于江西省寻邬县大竹岭。上游称浈水, 至广东省龙川县五合圩汇安远水后称东江。东江流域面积 3.32 万 km², 干流长 523 km, 落差 839 m, 多年平均年径流量 226 亿 m³。

东江干流水能理论蕴藏量 119.32 亿 kW·h/a, 可能开发水能资源总装机容量 146.14 万 kW, 平均年发电量 54.97 亿 kW·h。

东江水能资源不集中, 干流水能理论蕴藏量 33.64 亿 kW·h/a, 占东江干支流的 28.19%, 但可能开发水能资源占比重较大, 干流可能开发水电站装机容量 66.29 万 kW, 平均年发电量 24.56 亿 kW·h, 分别占干支流总量的 45.36% 和 44.68%。

由于淹没的限制, 除早已建成的枫树坝和新丰江等水电站规模稍大外, 待建水电站多数为低坝径流式水电站, 装机规模不大, 多数属小型水电站范畴。

(赵毓崑)

zhubianyaqi buzhi

主变压器布置 (layout of main transformers)

与发电机连接并传输电力的升压变压器的场地布置。主变压器是水电站的主要电气设备之一, 其场地布置对运行安全、维修方便和造价均有较大影响。对其布置有如下基本要求。

(1) 场地位置尽量靠近主厂房。这样可缩短与发电机连接的母线, 既能减少发电机大电流母线的电能损耗, 也能减少故障几率。而且主变压器安装或检修时吊芯检查可利用主厂房起吊设备。

(2) 充分考虑安装、检修和维护的方便。主变压器进行检修时, 需要搬运到主厂房安装场, 或专用检修间(架), 主变压器场地的高程宜与安装场、通道一致, 应设通至安装场或专用检修间的搬运轨道, 搬运时不应影响其他主变压器的正常运行。若就地检修, 则场地布置应满足就地检修的要求。

(3) 主变压器场地布置应符合防火有关规定。

(4) 当布置在楼板上时, 基础地板应有严格防渗措施。不跨越布置在水工建筑物的伸缩缝或沉降缝处。

主变压器的场地位置与水电站枢纽布置和主厂房型式关系密切, 并且与机组容量和台数等因数有关, 要经技术经济比较确定。

岸边式厂房的主变压器布置 岸边式厂房的主变压器一般布置在主厂房一端或上、下游侧。

(1) 主厂房一端。对于中、高水头水电站, 如主变压器单台容量较小 (如 50MV·A 及以下), 台数较少 (如不超过 2 台), 常把主变压器布置在主厂房外交通道进口的一侧 (见

图 1)。这样可节省投资, 也便于运行维护, 主变压器安装、检修可就近搬运进厂房安装场并

可利用厂房起吊设

备。如果主变压器容量较大, 台数较多, 由于发电机电压母线电流大, 母线截面大, 增加了电能损耗和有色金属消耗量, 还要增大母线廊道的尺寸, 因而采用主变压器布置在主厂房一端的方式就不一定合适, 可经过技术经济比较后确定。

(2) 主厂房上游侧。这种布置方式对于高水头水电站, 如果主变压器台数较多, 单台容量较大, 主厂房尾水平台又没有足够的空间布置主变压器的情况下是合适的, 但要考虑岸边山坡地形条件经技术经济比较确定。如果可行, 还要注意山坡滚石和山洪问题。这种布置方式, 与发电机间连接母线最短也最方便, 距主厂房近也便于运行维护, 也可利用主厂房起吊设备进行主变压器的安装和检修。

(3) 主厂房下游侧。对中水头水电站, 主厂房的尾

水平台有足够空间或只需适当加宽尾水平台, 可以布置主变压器及其搬运道, 把主变压器布置在尾水平台也是一个可行的方案 (见图 2)。其优点与布置在主厂房上游侧相同。但要考虑水

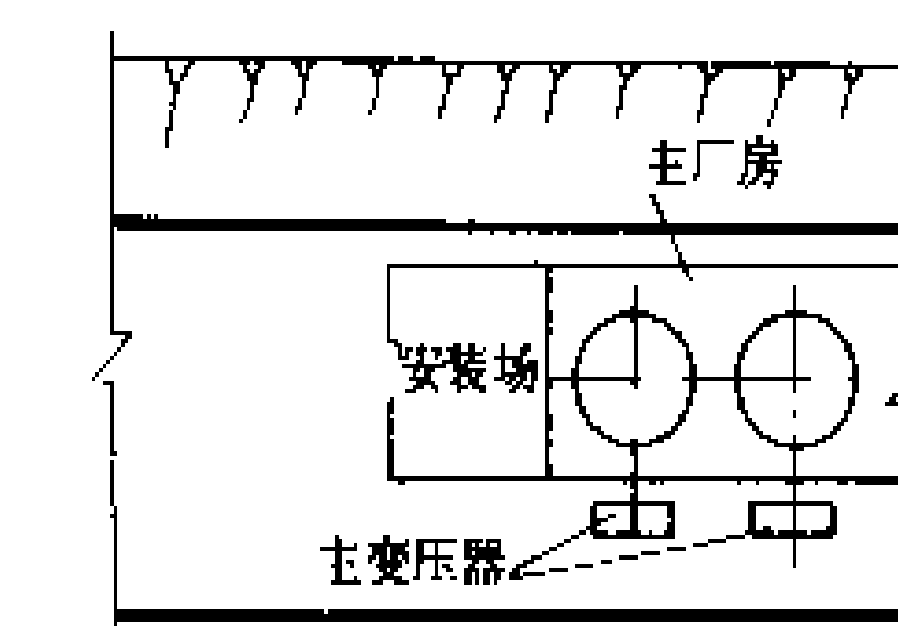


图 2 主变压器布置在主厂房下游侧

轮机尾水水力振动对主变压器的影响。

坝后式厂房的主变压器布置 坝后式厂房的主变压器主要布置在主厂房上游侧和下游侧。

(1) 主厂房上游侧。坝后式厂房大多为中、高水头水电站, 其上游侧与坝之间有相当的空间可以布置主变压器。布置在这里的主变压器, 其高压出线可以坝下游侧的坝坡作为挂点, 将高压架空线引至开关站。有些水电站由于引水压力管道与主厂房之间需留有相当大距离, 厂坝之间则有相当宽的场地, 此时也可把开关站布置在这里。这样发电机、主变压器和开关站三者, 可

zhu 主

布置得十分紧凑。主变压器布置在厂坝之间的方式见图3。

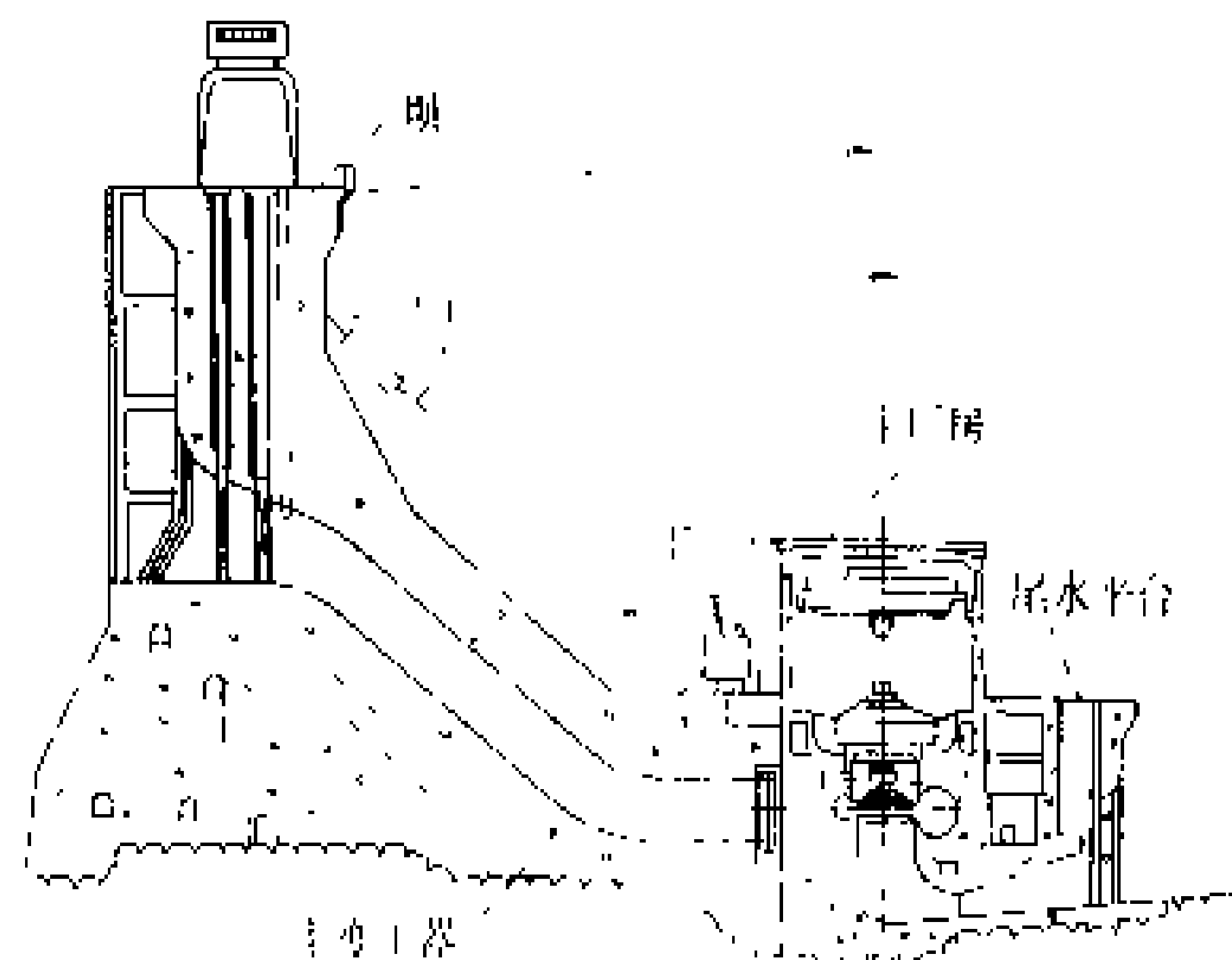


图3 主变压器布置在厂坝间

(2) 主厂房下游侧。有些水电站,其厂坝之间空间狭窄,把尾水平台适当加宽,用以布置主变压器。虽然增加一些尾水平台工程量,但在原尾水平台下也得到了必要的副厂房空间。

厂房顶溢流式和坝内式厂房的主变压器布置在河床狭窄、两岸地形陡峻的水电站枢纽中常采用坝内式厂房,或者用厂房顶作为水库泄洪溢流面,或从厂房顶上空挑流泄洪。主厂房位于坝空腔内或溢流建筑物下面。其主变压器布置有三种方式。

(1) 布置在坝内的空腔内。这种布置方式,发电机电压母线短,主变压器高压侧一般采用高压电缆引出,此时,主变压器应选用强迫油循环水冷却方式,主变压器场要考虑防火和通风措施。

(2) 布置在坝顶。主变压器布置在坝顶,发电机电压母线较长。一般只用于中型水电站,且主变压器台数在2台及以下,以减少发电机电压母线的电能损耗。此外,还要注意主变压器高压架空出线避开跨越泄洪水雾区。

(3) 布置在溢流式厂房内。与主厂房采用防火混凝土墙完全隔开,成为独立的主变压器专用室,主变压器高压侧通常采用高压电缆引至开关站。

河床式厂房的主变压器布置 低水头的水电站,一般是河床式厂房,水轮机的尾水管较长,尾水平台也较宽。因此,多数将主变压器布置在厂房下游侧尾水平台上。

地下式厂房的主变压器布置 地下式厂房的主变压器多数布置在地下主厂房附近与主厂房平行的独立洞室内,通过母线洞与主厂房的发电机连接。机组台数较少、单机容量较小的水电站,也可以布置在主厂房一端的洞室内。当开关站布置在地面时,主变压器高压侧通过高压电缆引至开关站。当开关站采用SF₆气体绝缘金属封闭电器,且开关站布置在主变压器洞室的顶

部时,则主变压器高压侧也可经SF₆金属封闭管道母线直接接至开关站。采用地下式厂房,主变压器布置在地面的情况也是有的。

(黄贤鉴)

zhuchangfang

主厂房 (main hall of power plant) 装置有水轮机、发电机及其附属设备的发电车间。它由主机间和安装间组成,是水电站厂房的主要部分,其空间尺寸要满足机组运行、检修、安装的需要,其结构应具有足够的强度、刚度及抗渗、抗冻、抗水流泥沙冲蚀能力。主机间高度大,一般分为若干层,通常最上一层为发电机层,发电机层楼面以上空间称为机房;水轮机蜗壳顶板至发电机层楼板之间的楼层,称为水轮机层,水轮机层以下的布置因装设的水轮机组的类型而异(见水电站厂房)。安装间上部空间的尺寸要与主机间上部空间协调一致,以便起重机行驶。

主厂房的结构一般分为上部结构、下部结构、中部结构。通常把发电机层以上结构称为上部结构,以下称为下部结构。主机间上下游墙内的二期混凝土如发电机支承结构、钢蜗壳的外围混凝土、发电机风罩等称为中部结构。

地面式厂房的主厂房分为:①户内式。主厂房具有上部围护结构,最高尾水位以上开设有门窗,可自然采光和通风,室内环境条件好。②封闭式。当水电站下游水位高,变幅大,又不宜将主厂房上部结构抬高到最高设计洪水位以上,为避免洪水淹没厂房而采用封闭式。这类厂房的对外交通通常采用隧洞或竖井联接。③露天式。主厂房无上部结构。发电设备皆布置在发电机层楼盖以下,机组安装和大修吊装时须先揭开发电机保护罩,通常采用露天可移动的门式起重机操作,受气候变化影响较大。

主机间 又称机组段。安装的水轮机可为冲击式或反击式,立轴或横轴,根据水电站的水头大小及单机容量而定。主机间空间尺寸及各层布置由机组台数,水轮机水道及发电机尺寸,起重吊装及设备维修,交通及水位变幅诸因素来确定。大中型水电站主机间的下部结构块体尺寸大,受温度变化和地基约束及不均匀沉降等因素的影响,产生的应力较大,通常需把主机间分成若干区段,每区段内布置一台至几台机组,各个区段之间设有变形缝和止水设施。

安装间 又称安装场、装配间、装配场。其面积按机组安装及大修时主要大部件摆放和修理、进厂运输车辆停车场地等需要确定。对于地面式厂房,安装间的地面高程一般要高于下游设计最高洪水位,但是有的水电站低于下游设计最高洪水位,为了防淹,进厂交

通采用隧洞下坡或其他挡水设施。安装间建基高程、下部结构尺寸、载荷情况都与主机间差别很大,岩基上厂房通常设有变形缝与主机间分开,非岩基上厂房或小型水电站也有不分缝的,安装间与主机间的下部结构是一个整体。如安装间建基面较低,从基础至安装间楼板之间有较大空间,可以布置副厂房的一部分,安置一些辅助生产设施。

主厂房的上部结构也称上层建筑,内装有供机组安装与检修使用的起重机(简称吊车)。地面厂房上部结构由屋面板、屋面支承结构、吊车梁、吊车柱、围护墙、楼板等组成。①屋面板有预制或现浇钢筋混凝土的,小型水电站也有采用其他屋面板材的。②屋面支承结构有钢制、钢筋混凝土制的桁架或大梁。③吊车梁有钢筋混凝土的(现场浇制、预制、预制现浇叠合等)、钢结构的(实腹板、箱形等),吊车梁支承在吊车柱的牛腿上,有的与吊车柱连成整体,形成厂房纵向排架。④吊车柱,大中型水电站吊车起重量大,且又是屋盖的支撑结构,断面尺寸大,故多为现浇钢筋混凝土结构。⑤围护墙有砖砌体和钢筋混凝土的,封闭式厂房常要承受水压力,故墙体厚,多与实体屋盖连成实体框架。地面厂房上部结构应与下部结构分缝相适应,缝构造需满足伸缩变形及止水要求。

地下厂房上部结构,除洞室支护结构外,通常四周设有防潮装饰的隔墙。供吊车行驶的结构,有的采用一般形式的吊车梁柱,有的利用衬砌拱座挑腿,有的采用岩锚吊车梁,有的采用岩台梁。

主厂房的下部结构是复杂的块体结构,通常用钢筋混凝土筑成,小型水电站也可能用砌体建造。主要包括挡水墙、钢筋混凝土进水蜗壳、尾水管、基础底板、河床式厂房还有进水口结构等。它承受设备传来的静力和动力,内外水压力,上部结构下传的载荷,并传递到地基。不同于一般工业厂房,它受水的作用以及地基情况的影响很大。

(1)挡水墙是直接承受水压力作用的围护结构,如河床式厂房进水口上的工作闸门及检修闸门的胸墙,地面式厂房下游最高洪水位以下的侧墙等。挡水墙墙体厚度根据结构布置情况、水压力大小及抗渗要求确定,处于水位变幅区的挡水墙还要考虑外界温度变化的影响。

(2)较高水头水电站的蜗壳均为金属蜗壳外包钢筋混凝土。水头较低的水电站采用钢筋混凝土蜗壳,其最大水头(包括水击压力升值)可达到70m(如中国石泉水电站),然而大多数设计水头超过30m的钢筋混凝土蜗壳为了防渗采用了薄钢板衬里。河床式厂房立轴轴流式水轮机通常采用过水断面为梯形的钢筋混凝土蜗壳,它的结构强度及抗渗都应满足要求。

(3)尾水管为连接水轮机转轮出口至尾水渠(洞)的泄水管道,回收转轮排出水流中的部分潜能。尾水管形式尺寸一般由制造厂提供。

反击式水轮机尾水管有直锥形和肘形;灯泡贯流式水轮机尾水管成平卧布置,由圆形断面变至矩形。①直锥形尾水管常见于小型机组。②肘形尾水管由圆锥段、弯段、扩散段组成,有利于减少厂房基础开挖深度。扩散段宽度较大时(如8~10m以上)增设1~2个支墩加强支承作用。通常圆锥段镶有钢板里衬,弯段及扩散段一般不设钢板衬护,但也有水电站弯段也带钢板衬护,少数水电站整个肘形尾水管为钢结构制作,省去混凝土浇筑施工模板和支撑。无论是锥形尾水管或是肘形尾水管,它的出口末端在机组全部运行期间要保持至少有等于 $v^2/2g$ 流速水头的压力(v 为尾水管出口水流平均流速; g 为重力加速度)且不小于30cm的淹没深度。

(4)下部结构最底层为基础底板。①非岩基上厂房,作用于底板的地基反力大,为满足基础应力及限制裂缝开展要求,常常底板要很厚,大型水电站可达8~10m,并配置相当多数量的钢筋。②岩基上厂房,载荷大部分通过蜗壳、尾水管的边墙和支墩等传递至基岩,作用于底板的地基反力相对较小,还可采取灌浆和排水措施降低扬压力,所以基础底板可以较薄,而且基础开挖面可按进水口、压力管道、蜗壳、尾水管等底部不同高程设计成阶梯形状,以节约开挖和混凝土浇筑工程量。对于基岩坚硬完整的,尾水管扩散段底板有的只做抹平衬护。基础底板中常设有排水廊道及集水井等,结构上需局部加强。冲击式水轮机的尾水槽(也称泄水槽)的底板及边壁必须耐水流冲刷,有的镶衬耐磨蚀材料。

主厂房的中部结构不直接与水流接触,主要是支承水轮发电机载荷,确保机组能安全运转。一般都是随着机组埋设件的安装分期浇筑。主要有水轮发电机支承结构、钢蜗壳外围混凝土及发电机风罩。

(1)水轮发电机支承结构(简称机墩)。其型式尺寸随机型、单机容量而异,有圆筒式、墙梁式、框架式、矮墩式等。机组重量、静力与动力由支承结构传递到下部块体,或通过钢蜗壳外围混凝土结构传递到主机间底板。支承结构要有足够的强度,其强迫振幅不得超过规定的限值。有一种伞式水轮发电机,其推力轴承安装在水轮机顶盖支架上,机组转动部分的载荷由水轮机顶盖传至地基的途径如下:水轮机顶盖→座环→固定导水叶→下环→厂房底板→地基。

(2)钢蜗壳外围混凝土。较高水头混流式水轮机进水通常采用钢蜗壳,其进口过水断面为圆形,钢蜗壳一般承担全水头的水压力,其外围混凝土仅作为发电机



支承的下部基础,不承担钢蜗壳的内水压力,为此需在钢蜗壳的上半部的表面与外围混凝土之间铺设弹性垫层,予以隔离。早期建设的水电站蜗壳尺寸不大,也有的不铺设弹性垫层,浇筑外围混凝土时钢蜗壳先充水加压,为了充水加压需另配备一套密封盖及加压设备,今已很少采用。随着大容量、高水头水轮机的发展,有的水电站采用了钢蜗壳与外围混凝土局部联合受力以改善靠座环边的钢蜗壳局部应力。

(3) 发电机风罩。有钢筋混凝土、砖砌结构。可作为发电机通风道的外罩;通常兼作发电机层楼板的中部支承用。

主厂房整体稳定分析 厂房必须满足抗滑、抗倾、抗浮等稳定要求。稳定分析应考虑运行期及施工期、检修期可能出现的各种不利情况。非岩性压缩性大的地基还要进行基础沉陷分析,控制沉陷变形在允许范围内。厂房地基要有足够的承载能力和抗渗透稳定性,有的地质条件差的尚需进行加固处理,加固处理措施一般有水泥固结灌浆、设抗滑齿槽、局部挖填、锚固桩等。河床式厂房地基,通常要设防渗帷幕和排水措施。

(李必如)

zhuchangfang jidian shebei buzhi

主厂房机电设备布置 (layout of electrical and mechanical equipment in main hall)

对水轮发电机组及其附属设备,厂内其他主要机电设备和辅助生产设备,根据设备安全要求和运行生产需要以及设备特点,进行合理的排列和布置。布置时要结合水电站枢纽总体布置实际条件,不同类型主厂房的建筑物特点,各种设备之间互相连接需要,以及防火、通风、采光等方面的要求,做到搬运、安装、检修、维护操作和生产管理这些设备既安全又方便,同时要使布置协调整齐。

主厂房一般分为机组段和安装场。①机组段主要布置水轮机、水轮发电机和油压装置、调速器、励磁装置以及水轮发电机组的自动化元件、继电保护、检测仪表、控制和动力等的机旁屏、柜。此外,还有发电机电压设备,如发电机引出的大电流母线以及电压互感器、电流互感器、隔离开关。当电气主接线需要时还装有发电机断路器、由发电机母线直接引接的厂用电电源变压器,发电机中性点引出的设备如电流互感器、接地消弧线圈或接地电阻等,发电机与有关设备连接的电缆和管道。②安装场是检修和组装机组部件的场地,一般与进厂道路处于同一高程,以便于设备运输进厂。发电机层高程,一般与安装场相同。主厂房装设起吊设备,用以起吊和运输安装场和机组段之间的设备。

水电站的水轮发电机组,可分为立式、卧式和贯流

式三种不同类型。机组型式不同,主厂房机组段的机电设备布置方式也各不相同。

立式水轮发电机组布置 这种机组的发电机、水轮机、蜗壳和尾水管成垂直叠装,由尾水管底板高程至厂房顶顶面高程的主厂房总高度较高,通常自上而下分为发电机层、水轮机层和蜗壳层,当发电机层与水轮机层高差较大时,为便于设备布置,在两层之间增设母线层。机电设备主要布置在发电机层、母线层和水轮机层。立式机组的发电机布置方式,一般有三种形式:①孤岛式布置,不设发电机层楼板,整个发电机定子风罩立式布置在主厂房内。这种布置方式,可改善水轮机层通风、采光和起吊设备的条件,但对机组附属设备的布置带来困难,发电机运行维护也不方便。②半岛式布置,只在上游侧或下游侧设一半发电机层楼板,其优缺点与孤岛式布置类似。③设有发电机层楼板。按照水轮发电机上部机架是否全部埋入,分为部分埋入式和全部埋入式。部分埋入式,即发电机上机架(见水轮发电机机架)布置在发电机层地面以上,其余部分埋入在发电机层楼板以下,它便于发电机上导轴承(见水轮发电机导轴承)的运行维护和上机架摆度的测量,但检修时发电机层较拥挤,且不利于缩小主厂房的宽度。全埋入式布置其发电机上部机架全部布置在发电机层楼板以下,这种布置的发电机层显得开阔宽敞,检修场地大,有利于缩小主厂房的宽度,特别是对采用晶闸管励磁系统的机组,不设励磁机或设小的交流励磁机更为突出。但此种布置对维护检查发电机上导轴承油位和测量机架摆度不便。

主厂房除机组以外的机电设备,通常都按其与机组密切相关部分的位置分别布置在发电机层、水轮机层或母线夹层内的上下游侧或机组周围。发电机层一般布置有调速器、油压装置和机旁屏等。水轮机层一般设有机组的油管、气管、水管和发电机母线、电缆等。油气水管分别布置在上下游侧,机组周围一般安排发电机引出母线和中性点出线设备。当发电机层与水轮机层之间设有中间夹层时,母线、电缆、发电机出线、中性点设备和水轮发电机励磁装置一般都布置在夹层内。

卧式水轮发电机组布置 一般机组成“一字形”与水流方向成垂直布置,即各台机组的轴线布置在一条直线上,虽然增加了主厂房的长度,但可减少主厂房宽度,机组之间距离由机组的总长度和两台机组间的运行维护通道决定。主厂房一般分上下两层布置,上层布置水轮发电机组、调速器和机旁屏等,下层布置机墩和机电辅助设备及管路等。上层高度由吊运发电机转子、定子和水轮机转轮等设备决定,必要时还需考虑一些特殊安装方法的要求。下层高度由发电机冷却器和油、

气、水管道和其他机电设备布置尺寸所决定。主厂房宽度由机组尺寸和上下游侧机电辅助设备以及运行维护通道尺寸所决定。

贯流式水轮发电机组布置 贯流式水轮机、发电机和尾水道顺河流方向成卧式顺向布置。其特点是：①主厂房高度较小。②每一机组段之间自成封闭，通过机组段上部厂房和进入机组的竖井相连通。③机组的辅助机电设备都布置在机组段上部的厂房内。

机组段的竖井有双竖井和单竖井两种方式，双竖井一般分别设在机组段的上、下游侧，除作为通道外，竖井尺寸还要满足水轮机和发电机分别从各自连通的竖井吊运最大部件的要求。双竖井有利于缩短安装和检修工期，但增加了主厂房宽度，一般适用于大型贯流式机组。单竖井的竖井尺寸要满足通道和机组各大部件的吊运要求。

(黄贤鉴)

zhuchangfang qidiao shebei

主厂房起吊设备 (hoist equipment of machine house) 为安装、检修、吊运水电站内机电设备而设置的专用提升设备。具有上部结构的厂房多采用桥式起重机，露天厂房采用门式起重机。因露天厂房较少，故水电站使用桥式起重机较多。

起重机主要部件 桥式起重机和门式起重机的主要部件大同小异。

(1) 桥式起重机。由大车（桥架）、行走机构、小车、提升机构、控制室等部件组成，安放在厂房两侧横梁的专用钢轨上。见图 1。

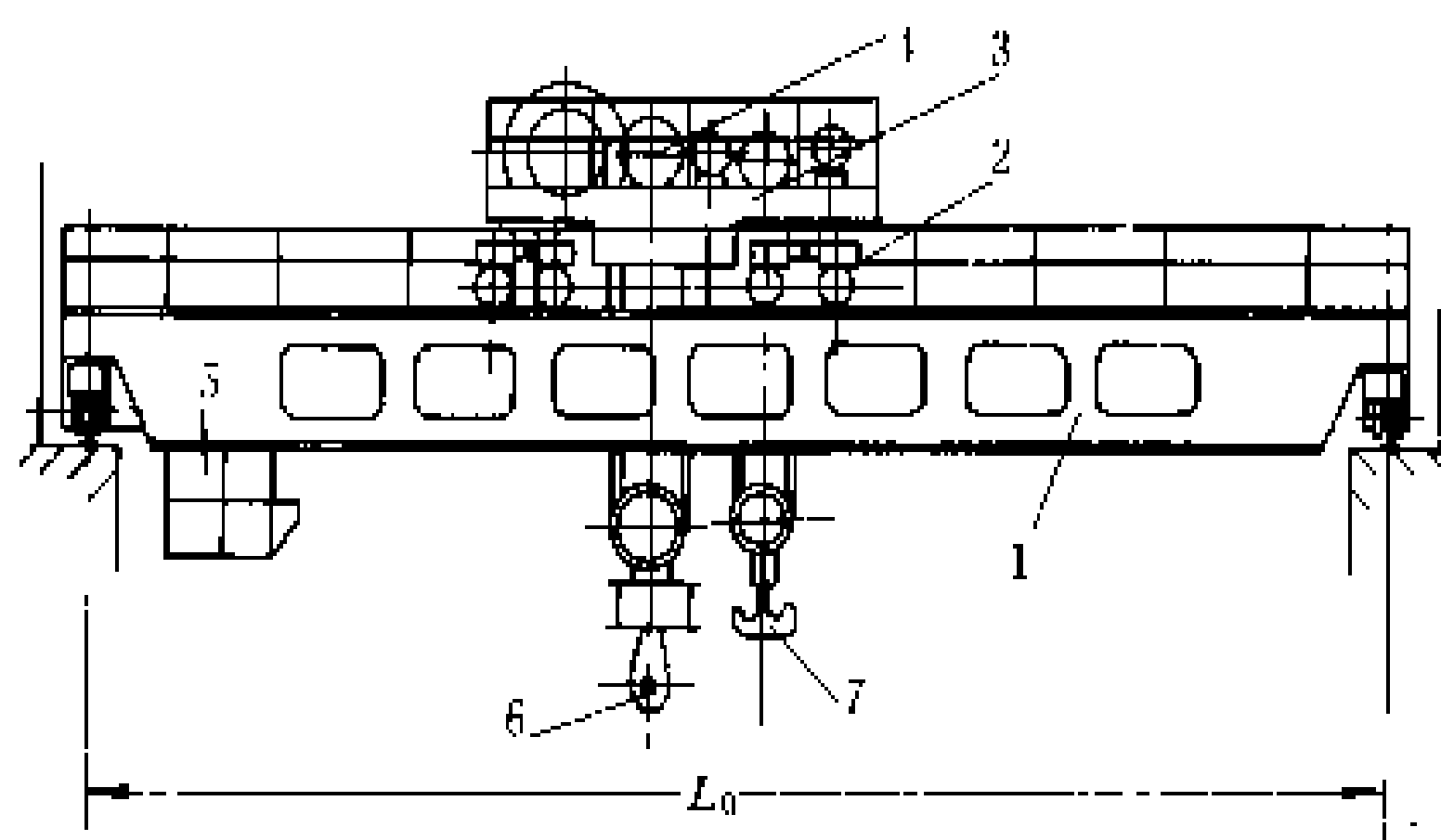


图 1 桥式起重机

1—大车；2—行走机构；3—小车；4—提升机构；5—控制室；6—主钩；7—副钩

每台起重机一般都设置主钩和副钩，主钩的起吊重量为起重机的额定容量，副钩的起吊重量根据产品标准或电站要求配置。

(2) 双小车桥式起重机。为提高起重机的容量、节约钢材及方便大件设备翻身、倒置等要求，由在加强的桥架或门架上安放两台容量相同的小车构成，每台小

车如只设主钩，其起升速度可手动换档到副钩速度，小车可单独起吊运行，也可两台通过平衡梁联合起吊，起重量为主钩容量的 2 倍。双小车桥式起重机见图 2。

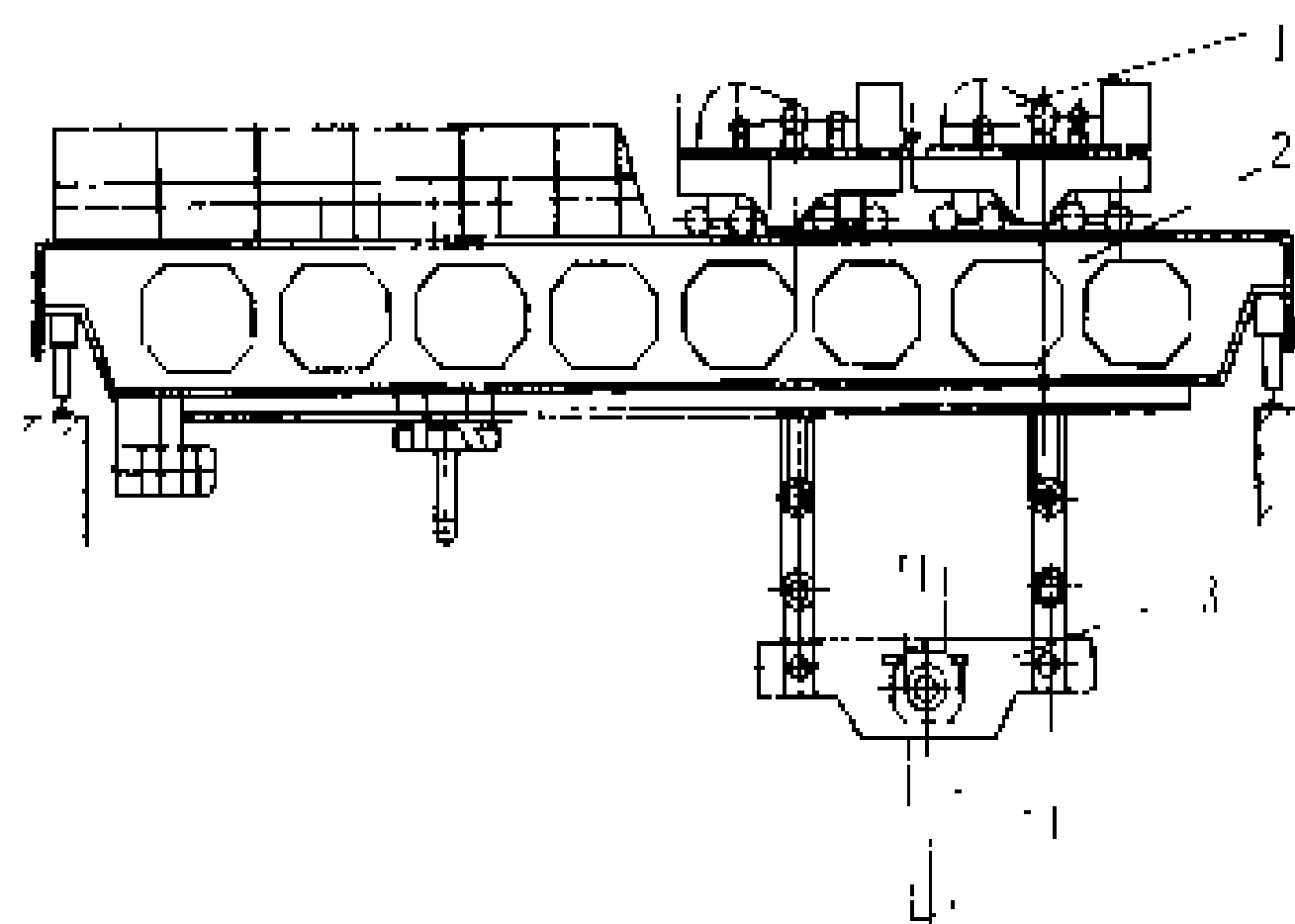


图 2 双小车桥式起重机

1 小车；2 大车；3 平衡梁；4 主轴

(3) 门式起重机。由门架、行走机构、小车、提升机构和控制室等部件组成，安放在厂房地面两侧的专用钢轨上，见图 3。

起重机的主要参数 主要参数包括起重量、跨度、起升高度、起升速度、行走速度、工作制等。

(1) 起重量。起重机允许起吊的最大重量或称额定容量，根据需要按国家标准确定，中国目前生产的起重机的最大容量为 800 t。

(2) 跨度。起重机大车或门架两侧轨道中心线之间的垂直距离，以 m 计，如图 1 中的 L_0 。不符合标准尺寸时，可按每隔 0.5 m 确定。

(3) 起升高度。吊钩上极限位置与下极限位置之间的高度差，以 m 计。

(4) 起升速度。起吊部件的上升速度，以 m/min 计，一般主钩的起升速度范围为 0.5~1.5 m/min，副钩的起升速度范围为 2~7.5 m/min。

(5) 行走速度。起重机大车（门架）和小车的行走速度，以 m/min 计，大车的行走速度范围为 20~35 m/min，小车的行走速度范围为 10~20 m/min。

(6) 工作制。按起重机各机构工作忙闲程度和载荷率划分的等级，水电站厂房起重机除刹车机构采用中型外，其余部件都为轻型工作制。

起重机选择 桥式起重机在水电站中主要用于水轮机、发电机、进水阀、主变压器等大型设备及一般机电设备的吊运、安装。

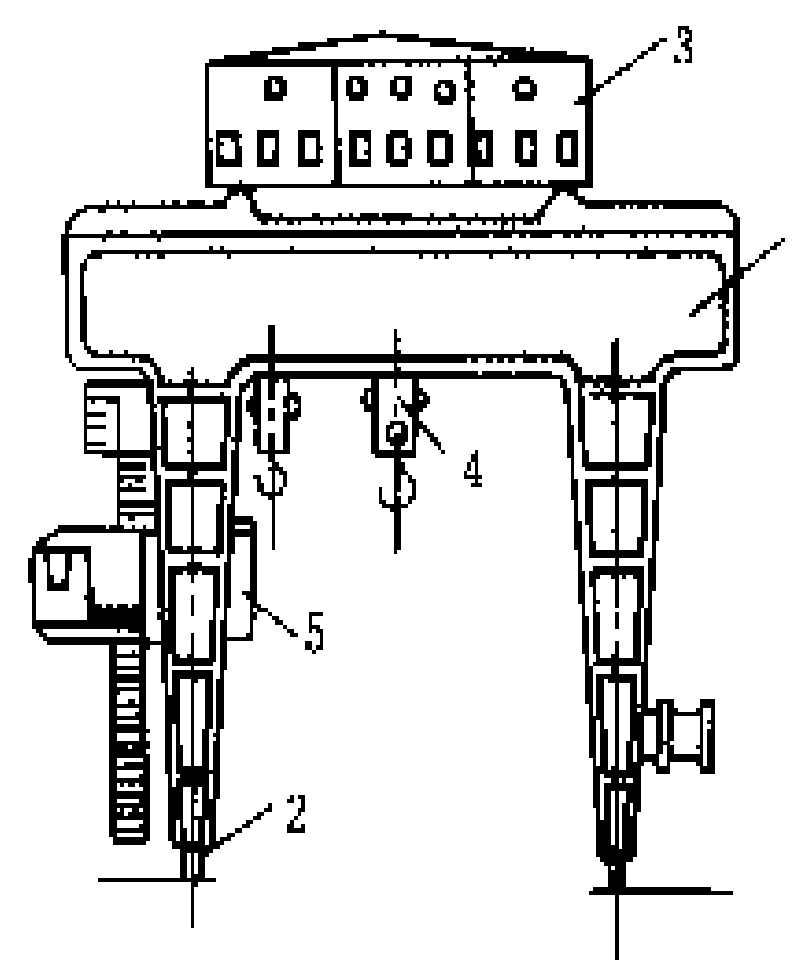


图 3 门式起重机

1—门架；2—行走机构；3—小车；4—提升机构；5—控制室

(1) 起重机按照最重部件重量并参照起重机系列标准留一定裕量并上靠一档选用。

(2) 机组台数较多的水电站多选用两台桥式起重机,利用平衡梁吊运最重件,起重机的容量仅为最重件重量的 1/2 强。

(3) 巨型水电站可选用两台双小车桥式起重机利用三根平衡梁起吊最重件,见图 4。

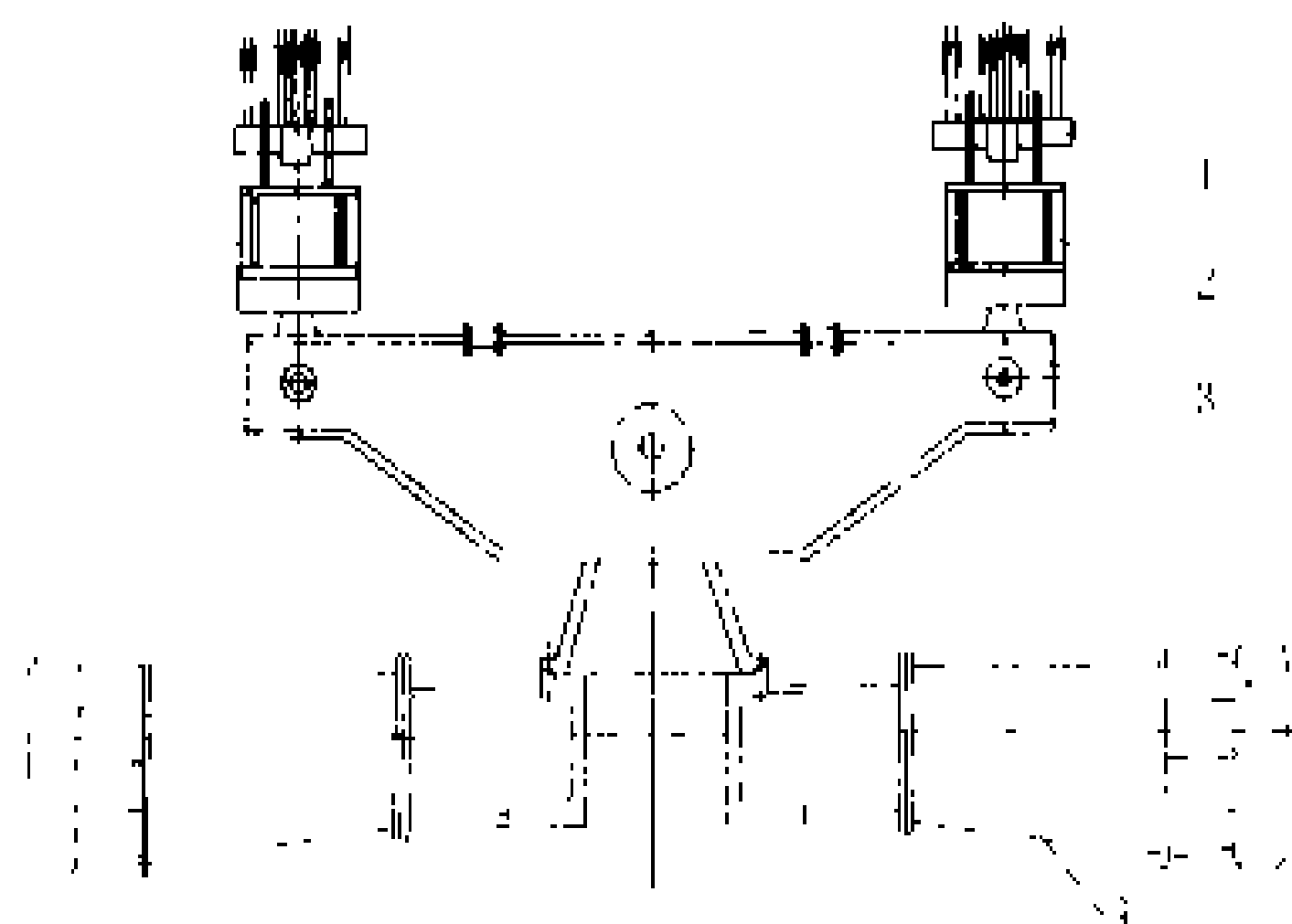


图 4 三根平衡梁吊发电机转子图

1—小车滑轮组; 2—小平衡梁; 3—大平衡梁; 4—发电机转子

起重机试验 桥式起重机安装或大修后,在吊运最重件设备之前,一般均进行负荷试验,以保证吊运安全可靠。负荷试验分静负荷试验和动负荷试验。静负荷试验的载荷为起重机额定容量或最重件设备重量的 1.25 倍,动负荷试验的载荷为起重机额定容量或最重件设备重量的 1.1 倍。

试验方法有:①利用混凝土试块;②利用液压负荷试验器;③利用减小滑轮倍率方法对提升机构作动负荷试验;④仅对刹车装置进行试验等。也有利用最重件设备作为载荷在起吊过程中采取逐步提升和行走等措施来达到试验的目的。

(青长庚)

zhuān xiàng qiǎn jiàn

专项迁建 (relocation and reconstruction of special projects)

被水库淹没影响的工矿企业,交通、电信、广播、电力线、管道工程等,库区交通设施,国有林场、农场、牧场,文物古迹,矿产资源等各项淹没对象进行迁移、改建、重建、挖掘或防护等措施。

在中国,专项迁建的淹没处理原则和措施要根据各专项的性质而分别确定,须经过规划和技术经济论证,选择最合理的迁建或其他处理方案,以恢复其原有功能及效益。

(1) 工矿企业迁建。包括工厂、矿区和生活福利区,按原有规模、原有标准予以迁建恢复,但其设备和可迁

的物资只计迁运费与安装费,或按不可利用部分的固定资产时值价予以补偿。根据其受淹的特性与程度、规模大小、重要性、原材料产地及淹没影响的具体情况,可采取库边后靠、外迁新址、与同类企业合并或工程防护的方式。对厂址选择需考虑合适的地质地形条件,有良好的水源,不占或少占良田,有利于环境保护,并能利用邻近的社会基础设施,靠近附近的相关企业与原材料产地。

(2) 交通、电信、广播、电力线路与管道工程等的迁建。除线路外还包括配套设施(车站、养路站、巡房、增音站、支局、所、扩大站、变电站等)和生活设施。其处理原则,按原有的等级和技术标准进行迁移改建,应考虑利用原有的设备和旧料。对已失效或报废的设施,经主管部门同意不需恢复、改建者,将可迁部分作拆运处理。这些专项设施均具有带状和网状分布的特点,一般受水库淹没与影响的只是该线路的区间一段或者是某一网络中的一个小网块,所采取的处理措施一般为修筑防护工程,将原线路垫高加固,线位上移至淹没水位线以上,变更线路走向(或路由)另择新线等。在规划设计中需作技术经济论证和方案比较,在恢复原有功能的前提下选定最优方案。

(3) 库区交通设施恢复。水库形成后库区及库周的交通条件必将发生变化,有利于利用水库更大的水面发展航运。改建项目一般有恢复和开辟新的航道、港口、码头、渡口、渡船和桥梁,以及相应的连接道路和人行路,以沟通水陆交通。

(4) 国有林场迁建。包括场区生产、生活设施的迁建,职工迁移以及对淹没用材林、经济林的处理。按原有规模迁建,林木伐运按库底清理的要求实施,幼林应尽量移植再生,无条件恢复的可与邻近林场合并。

(5) 国有农、牧场迁建。对场区的生产、生活设施按原有规模迁建或合并、撤销。

(6) 文物古迹的处理。包括革命遗址、遗迹和纪念建筑物,石窟,石刻以及具有科学价值的动植物化石,根据它们的历史、艺术、科学的价值以及受淹的性质,确定是否采取工程防护、发掘、拆除、迁移、复建或不发掘。对一些地面上的文物虽很重要,但又不能全部迁移者,则应做好详细的科学记录、摄影、拓片、凿取或塑制必要的模型。

(7) 矿产资源的处理。包括金属、非金属和能源矿产。对有开采价值的矿产,根据矿体分布的高程可安排加大开采强度或提前开采。对有重要价值的矿产,必要时降低近期水库运用水位延长采掘时间,或采取工程防护,或者允许淹没压复矿床。

(8) 防护工程。为了充分开发水资源,面又要尽可能地减少耕地及重要对象的淹没损失,并缓解移民安

置的困难,或遇有不允许淹没的特殊对象,采取防护是一种积极而又现实的补救措施。确定淹没对象进行防护必须论证其必要性和技术可能性和经济合理性。对防护工程的规模、工程布置、结构形式、经济效益等需作方案比较,进行勘测设计。为有效地发挥防护工程的作用,减少工程造价和年运行、管理费,宜选择防护区的有利部位,一般分布在经常淹没区的浅水区、临时淹没区、坍岸区以及库区的分水岭垭口。防护工程建筑物的设计洪水标准一般比淹没迁移标准要提高一级。水工建筑物的结构有土堤坝、石堤坝、混凝土堤坝以及闸门、排水站、排洪渠道、截水渠道等配套工程,也有采用挡土墙或护坡的形式。另外,对于固结库岸稳定的防护措施,还可采取植树造林等生物工程。

(张根林)

zhuanolun

转轮 (runner) 水轮机将水能转换为机械能的工作部件。按水轮机分类的原则,转轮分为反击式水轮机的转轮和冲击式水轮机的转轮两大类。

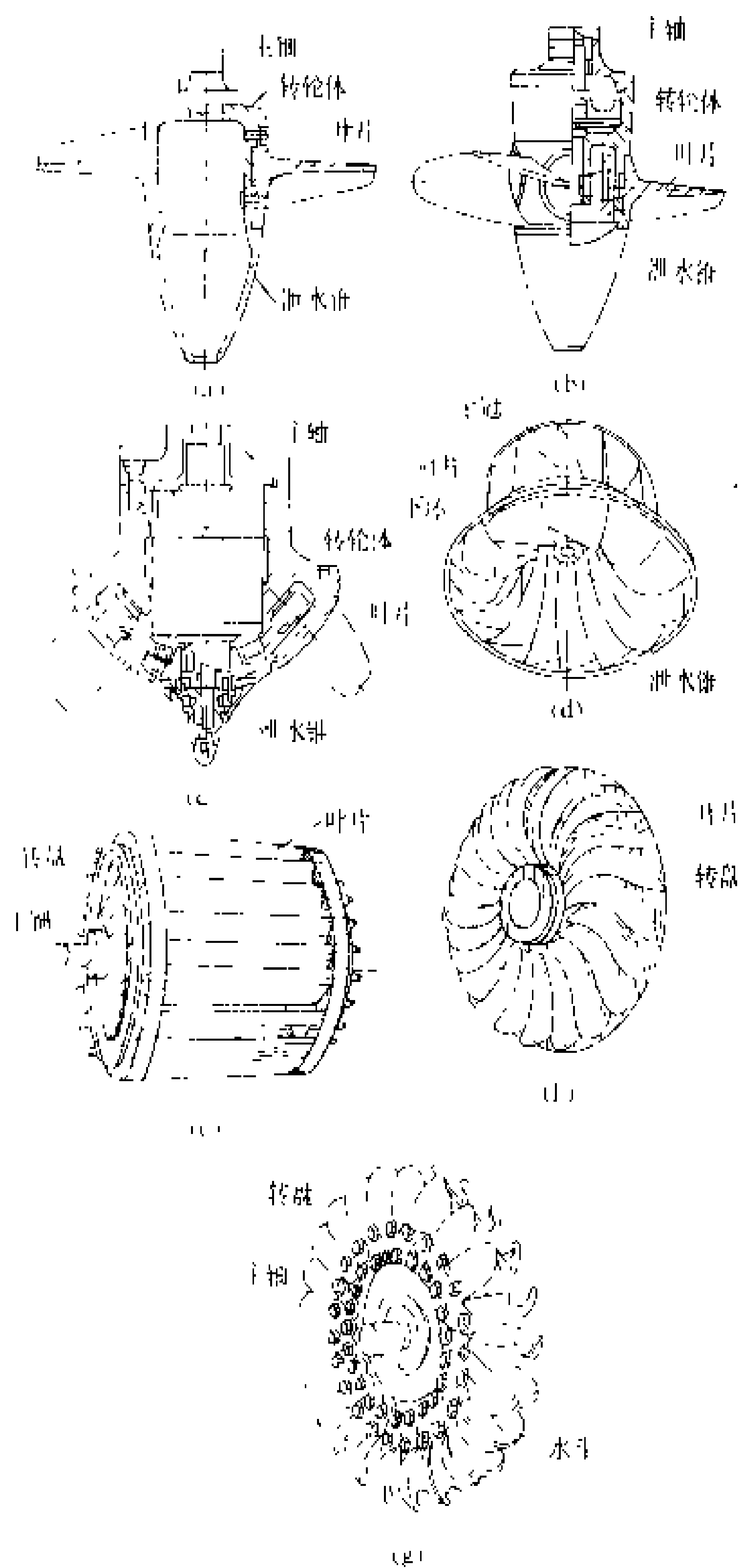
转轮的结构 根据水能转换方式的不同,转轮结构有所不同,各种类型的转轮结构见图。

轴流式水轮机转轮 轴流式水轮机分定桨式和转桨式两种。①轴流定桨式水轮机的转轮[见图(a)]一般有3~6片叶片。中小型转轮叶片和转轮体整体铸造[见图(a)左侧]或叶片铸造后焊在转轮体上。大中型转轮的叶片多数为单独铸造,加工后用螺栓固定在转轮体上[见图(a)右侧],在转轮体与叶片连接法兰面上设有定位销固定在一个安放角。有的停机后可以人工调整叶片定位销改变叶片的安放角。转轮上部和主轴相连,下部固定泄水锥,结构简单,制造容易,造价便宜,适用于水头、出力变化小的情况。②轴流转桨式水轮机的转轮[见图(b)],叶片安放角能自动地随工况而变,并和导水叶开度相匹配。为了转动叶片,转轮体内装有活塞、油缸、活塞杆、操作架、连杆、拐臂等,上部和带压力油管的主轴相连,下部固定泄水锥,结构复杂,造价贵,运行范围广,平均效率高。低水头电站的贯流式水轮机上常采用这种转轮,其主轴多数为水平布置,少数为倾斜布置。

斜流式水轮机转轮 斜流式水轮机转轮[见图(c)],叶片安放角也能自动地随工况而变,并和导水叶开度相匹配,但叶片转动中心线和水轮机轴线成一斜角(45°~60°),使用水头较高,叶片较多,其结构较轴流转桨式水轮机的转轮更复杂,目前应用不广泛。

混流式水轮机转轮 混流式水轮机转轮[见图(d)]叶片是固定的,数量多达十几片,叶片上端和上冠相连,下端用下环互相连接。上冠和下环均设有减少

漏水损失的止漏环,其形式和水头及含沙量有关,有间隙式、迷宫式、阶梯式及梳齿式,当转轮材料为不锈钢



各种类型水轮机转轮结构示意图

(a) 轴流定桨式水轮机转轮; (b) 轴流转桨式水轮机转轮; (c) 斜流式水轮机转轮; (d) 混流式水轮机转轮; (e) 双击式水轮机转轮; (f) 斜击式水轮机转轮; (g) 水斗式水轮机转轮

时,止漏环可直接加工在转轮上,否则可用热套、焊接或螺丝固定。上冠上部和主轴相连,下部固定泄水锥,上冠上设有减少轴向水推力的减压泄水孔,高水头转轮叶片较长,不便设置泄水孔时,改为顶盖排水管。混流式水轮机的转轮结构简单,强度高,是使用得最广泛的一种转轮。大型转轮因受运输条件的限制而采用分半结构。分半转轮的上冠用螺栓固定,下环在工地组装后焊接,分半面的选择应根据叶片数对称和减少叶片切割长度为原则。这种转轮有整铸结构,近年来为保证叶片线型更多的是将上冠、叶片和下环单独铸造后再

焊成一体的铸焊结构。这种转轮也有无下环的,它转速高、过流量大。

冲击式水轮机转轮 从结构上可分为双击式水轮机转轮 [见图 (e)]、斜击式水轮机转轮 [见图 (f)]、水斗式水轮机转轮 [见图 (g)] 3 种。前两种结构简单,但效率和强度较低,只用于中、低水头的小型水轮机,绝大部分冲击式水轮机的转轮是水斗式的。一般有 20 个左右水斗均匀分布在轮盘四周,轮盘直接和主轴相连,结构强度高,适用于高水头水轮机,它结构简单,维护方便。这种转轮有三种结构:①装配组合式,其水斗可以是单个、两个或几个铸成一体,加工后用螺栓固定在轮盘四周,各斗柄之间用锥销或斜楔楔紧,以防运行时松动,这种结构铸造质量容易保证,个别水斗损坏更换方便,机械加工量大,固定螺栓容易断裂。②整铸式,水斗和轮盘整体铸造,强度较好,铸造技术要求高,目前已广泛采用。③铸焊式,水斗和轮盘分别铸造后再焊成一体,铸造质量有保证,焊接技术要求高。

转轮的材料 从结构上要求高强度;从水力上要求耐磨损、抗汽蚀和腐蚀;从工艺上要求有良好的铸造、焊接和加工性能。转轮的不同部位有不同的要求:转轮体、上冠、轮盘、泄水锥可用普通碳素钢制造;止漏环、水斗、叶片可用不锈钢制造。对于中低水头清水电站的转轮可全部采用普通碳素钢制造,对于高水头多泥沙水电站的转轮可采用整体不锈钢转轮,常用镍-铬不锈钢,如 ZGCr13Ni2、ZGCr13Ni6N、ZGCr13Ni4 及 ZGCr16Ni5Mo 等。

(吴次光)

zhuānlún gōngchéng zhǐjīng

转轮公称直径 (nominal runner diameter)

代表水轮机转轮规定部位的直径,以 D 表示,单位为 m 。因水轮机的型式结构不同, D 所表征的部位不一。轴流式水轮机为转轮叶片轴线处叶片外缘直径(或转轮室内腔直径),用 D_1 表示,见图 (a);斜流式水轮机为转轮叶片的转动轴线与转轮室交点处的直径 D_1 ,见图 (b);混流式水轮机为转轮的进口叶片进水边和下环相交处的直径 D_1 或转轮出口叶片出水边和下环相交处的直径 D_2 ,见图 (c);冲击式水轮机为转轮水斗与射流中心线相切处的节圆直径 D_1 ,见图 (d)。

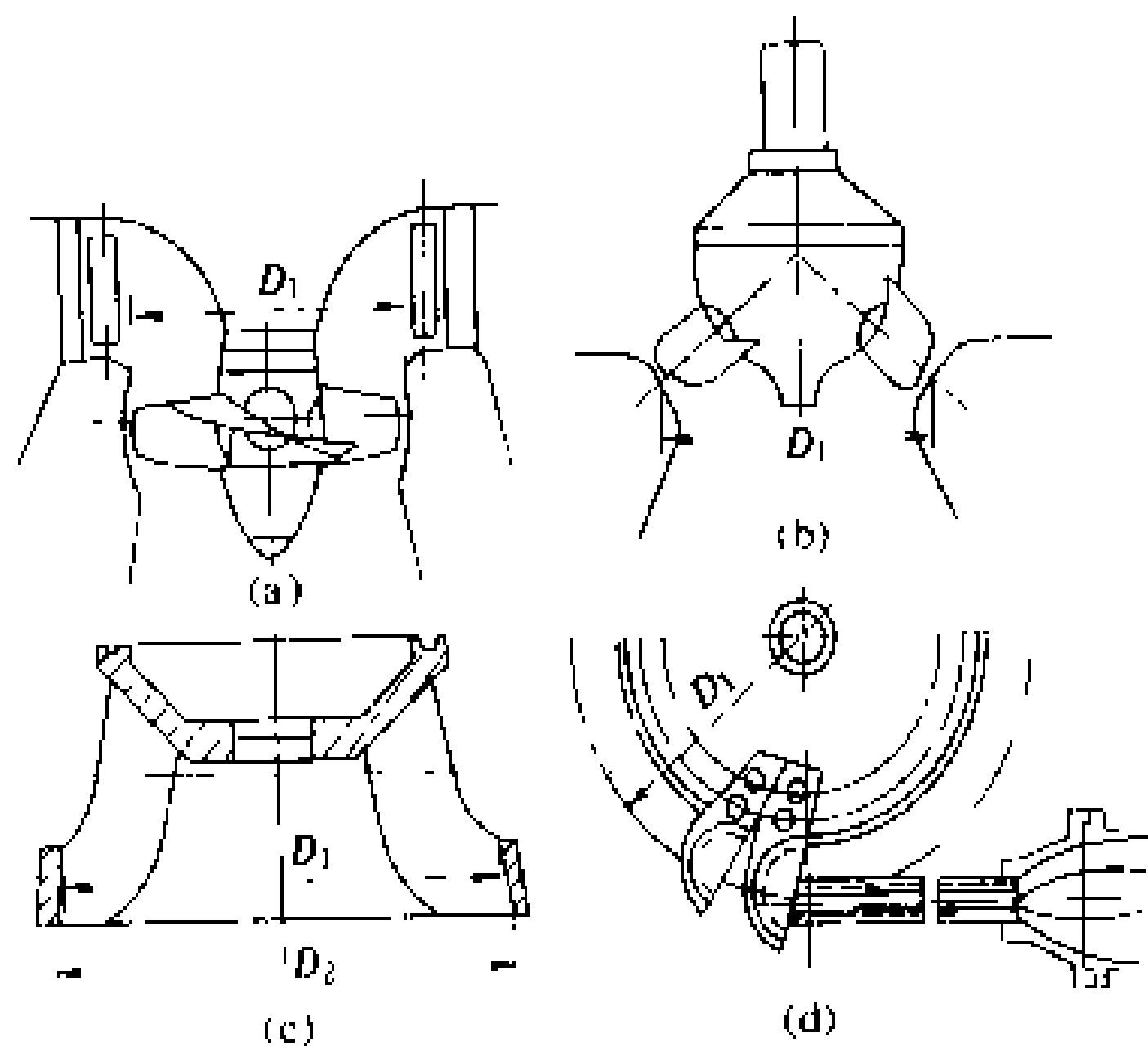
转轮公称直径由下式计算

$$D_1 = \sqrt{\frac{P_g}{9.81Q_1 H_n \eta_h \eta_g}}$$

式中 P_g 为发电机出力, kW ; Q_1 为模型水轮机单位流量, L/s ; H_n 为水轮机额定水头, m ; η_h 为原型水轮机效率, %; η_g 为发电机效率, %。

为有利于制造和发展,世界各国制造厂对中小型

机都制订有公称直径的标准系列,设计选定转轮直径时,一般都根据计算并按系列标准用内插法向上靠一档选定,对大型机则不受系列约束。



水轮机转轮公称直径

(a) 轴流式水轮机; (b) 斜流式水轮机; (c) 混流式水轮机; (d) 冲击式水轮机

(青长庚)

zhuānsù shàngshēnglǜ

转速上升率 (speed rise ratio) 水轮发电机组甩负荷时其转速上升最大值与额定转速之比的百分值,以 β 表示。转速上升率是水轮机调节保证计算的重要内容,是发电机设计和满足电力系统稳定运行的重要参数之一,它反映调节过程中机械惯性的作用。水轮机导水叶或针阀的关闭时间愈短,转速上升率愈小。

(1) 转速上升率计算。其计算式为

$$\beta = \left[\sqrt{1 + \frac{(2t_1 + t_2 f)c}{T_s}} - 1 \right] \times 100\%$$

式中 t_1 为调节滞后时间, $t_1 = (0.1 \sim 0.3) + 0.5T_s b_p$, s ; f 为考虑水锤压力影响的系数, $f = 1 + \sigma$; σ 为引水管特性系数; b_p 为调速器永态转差系数,一般取 $2\% \sim 6\%$; c 为考虑水轮机飞逸特性影响的系数,

$$c = \frac{1}{1 + \frac{\beta_r}{n_c - 1}}, \beta_r = \frac{2t_c + ft_c}{2T_s(1 + 0.5\beta_r)}, n_c = \frac{n'_{1c}}{n'_1}, n'_{1c} \text{ 为}$$

单位飞逸转速, r/min ; n'_1 为甩负荷时初始单位转速, r/min ; T_s 为机组惯性时间常数, $T_s = \frac{GD^2 n_0^2}{365P_0}$, s ; GD^2

为机组的飞轮力矩 $N \cdot m^2$; n_0 为甩负荷时初始转速, r/min ; P_0 为甩负荷前水轮机轴功率, kW 。

(2) 转速上升率限值。它是一个技术经济指标,早期水电工程将转速上升率限制在 $30\% \sim 40\%$,以后随着技术水平提高和电力系统的扩大有所提高,目前中



型机组达到的最高值为 65%。水轮机的飞逸转速，一般均为其额定转速的 1.7~2.6 倍。工程中将飞逸转速作为事故条件，要求机组一旦失控时在飞逸转速下应能连续旋转 2~10 min 不产生有害变形，发电机结构强度也以此作为设计计算基础，除小型机组外，必须根据机组容量及其在电力系统中的比重、重要性，在保证电力系统稳定运行的前提下妥善选定。

(青长庚)

zhuangji rongliang

装机容量 (installed capacity) 水电站水轮发电机组铭牌容量的总和。它是水电站最重要的特征值之一，包括工作容量、备用容量、检修容量和受阻容量（见水电站设计水头）。在中国常将同一计算时段内的工作容量、备用容量和检修容量之和称为必需容量。在不同水文年、不同季节中，随着水电站运行状态以及电力系统对水电站的要求不同，这些容量可能是不同的，而且在一定的条件下，它们之间是可以相互转化的。工作容量随水电站能量的大小及系统负荷要求而变化，丰水期（能量大）和负荷大时，工作容量大，相应备用容量可小些；枯水期（能量小）和系统负荷小时，工作容量较小，备用容量可大些。水电站机组检修，一般安排在枯水季，故枯水季检修容量大。库水位低时或低水头水电站在汛期下泄流量大时，由于水头减小，可能出现受阻容量，水头愈小，受阻容量愈大。

水电站装机容量的大小决定于水电站的能量指标、水电站在系统中的地位和作用及其技术经济特性。

水电站的能量指标 能量指标包括保证出力和多年平均年发电量，是决定其装机容量的基础。水电站以其能量参加电力系统电力电量平衡，以核定其容量和电量的效益。

水电站在系统中的地位和作用 其地位和作用决定于水电站能量在年内的分配、水电站在系统日负荷图上的工作位置及担负系统备用容量的大小。当能量一定时，水电站分配在系统负荷大月份（容量平衡控制月份）的能量愈多，其装机容量愈大；水电站在日负荷图上的工作位置愈靠近尖峰，即水电站在一天内的工作小时数愈少，担负调峰任务愈多，其装机容量愈大，但水电站在一天内的工作小时数，决定于电力系统尖峰的历时；水电站担负系统的备用容量愈多，其装机容量愈大。所以水电站的装机容量远大于保证出力，装机容量与保证出力的比值往往达到 2~5，甚至更大。

水电站在系统中的地位和作用，受其调节能力的制约。具有季（年）调节能力以上的水电站，才有可能将其能量较多地分配到负荷大的月份，并能担负事故备用。具有日调节以上调节能力的水电站，才能担负系

统日负荷的尖峰负荷和负荷备用。具有不完全日调节能力、无调节或下游有航运基荷要求的水电站，只能分别担负系统日负荷的腰荷或基荷，装机容量相应受限制。

水电站技术经济特性 与火电厂相比，水电站具有起停快、运行灵活，适宜于调峰和担负系统备用容量的技术特性；且当坝高已定时，增加容量的费用低于火电厂（约为火电厂的 1/2）和增加容量可相应增加发电量，从而有节约火电燃料的经济特性。故在一定的条件下，增加水电站的容量比火电厂经济。故水电站的装机容量年利用小时数（即多年平均年发电量与装机容量的比值）或电站年负荷因数（装机容量年利用小时数除以 8760），一般比火电厂小。调节性能较好的水电站，且系统水电比重又不大时，其装机容量年利用小时数可至 3000 或更小。调节性能较差，且电力系统水电比重较大时，水电站的年利用小时数可在 5000 以上。

装机容量选择 常规方法是拟定水电站不同的装机容量和装机程序方案，进行经济评价，评价中应包括与装机容量有关的输电线路及输电损失。当规划期内将有若干个电站投产时，必须进行水电群的装机容量选择，此时若独立地进行个别电站的装机容量选择，常常带来谬误的结果。常规方法是，先进行水电群的综合装机容量的选择，然后再进行水电站间装机容量的分配。影响水电站群装机容量分配的技术经济因素为：①输电距离长的电站装机容量宜小些。②长引水道的电站调峰性能较差，且增加容量费用较大，装机容量不宜过大。③有综合利用限制（如航运基荷要求）的电站，装机容量将受限制。④增加容量所增加的发电量大的电站，装机容量宜适当大些。⑤地面厂房电站增加容量比地下厂房增加容量有利。⑥梯级电站的装机容量分配，要照顾到容量的协调及运行的需要。⑦为了补偿调节的需要，某些电站的装机容量宜适当加大。

优化方法 是应用优化模型，进行规划期水火电站装机容量优化，含装机容量及逐年的装机程序。模型可用动态规划或（和）线性规划构造。（见水能利用优化）

由于电力系统负荷不断加大，电力系统联网，系统内火电大机组和核电机组不断增多，以及水电站的能量指标随着梯级调节和跨流域补偿调节的实现可能有较大改善等原因，水电站合理装机容量应随时间推移而加大。世界上有不少水电站都采用分期建设的方案，或在完建若干年后进行扩建以扩大装机容量。

(伍宏中)

zonghe liyong gongcheng feiyong fentan

综合利用工程费用分摊 (construction cost

allocation of multi-purpose project) 确定有综合利用效益的水电工程的费用(基建投资和运行费用)由各受益部门承担份额的原则和计算方法。综合利用工程费用分摊的目的在于应用经济杠杆,合理处理综合利用各部门效益和费用的关系,使水资源最有利地为国民经济各部门服务。费用分摊中,一般将工程的建筑物及设施分为共用工程、专用设施和补偿工程设施三部分。共用工程含挡水建筑物(大坝、河床式水电站的厂房)和泄洪设施等。专用设施是为某一部门设置的专用设施,含发电引水建筑物、厂房及机电设备、灌溉取水及引水建筑物、过船或过木(竹)建筑物及设施等。补偿工程设施含通航河道上的过船设施、漂木河道上的过木设施及洄游河道上的过鱼设施等。各受益部门分摊的费用,为该部门专用设施的费用和应分摊的共用工程费用和应分摊的补偿工程费用之和。

费用分摊方法 费用分摊方法有多种,包括按所用库容或用水量的比例分摊、按经济效益比例分摊、按在河川上兴建获得同等效益的单独工程费用的比例分摊、按兴建获得同等效益的替代方案费用的比例分摊以及按分离费用-剩余效益法分摊等。

(1) 按参与综合利用工程各部门所用的水库容积、用水量等指标的比例分摊。此法直观易懂、计算简便。但各种指标相互联系、互相依赖,不易精确划分。如防洪库容和兴利库容可以部分或全部共用,发电、灌溉和航运用水在时间和数量上也难以划分清楚等。

(2) 按参与综合利用工程各部门所获得的经济效益的比例分摊。此法体现了投入产出的概念,易于理解。问题在于各部门的效益计算基础难以统一。而且有些部门如防洪、航运部门效益不易算清楚,实际应用有一定困难。

(3) 按在河川上兴建能获得同等效益的单目标工程的费用比例分摊。此法概念清楚,也较为合理。但工作量大,且可能导致某些次要部门分摊费用偏大。

(4) 按获得同等效益的替代方案的费用比例分摊。此法以各部门开发目标为依据,选择合理的替代方案。如发电以另建火电厂替代;航运以河道整治或以陆上交通替代;防洪以加高加固堤防、开辟分蓄洪区等替代;灌溉用分散建提水站替代。替代方案的选择及工作量大是本法的缺点。

(5) 按分离费用-剩余效益法分摊。此法理论较完善,为一些西方国家普遍采用,中国在三峡工程论证时也采用过此法。计算步骤为:①计算与各部门所得效益相当的等效替代方案费用的现值,作为该部门费用。②计算各部门的可分离费用和剩余共用费用。某部门的可分离费用等于工程总费用减去不包括该部门,而使剩余部门仍保持原有效益的工程费用之差值。工程

总费用减去各部门可分离费用即为剩余共用费用。③由各部门的替代方案费用减去可分离费用现值,即为该部门的剩余效益。④按各部门剩余效益的比例分摊剩余共用费用。⑤各部门可分离的费用与分摊的剩余共用费用之和即为该部门应分摊的费用。此法缺点是计算工作量太大,一般应用于大项目。

费用分摊结果应满足的条件 费用分摊涉及面广,尚无公认的适用于多种情况的统一方法。普遍的做法是根据工程的具体情况,以一种方法为主,辅以其他方法,结合电站综合利用的主次关系进行综合分析,确定相对合理的分摊比例。其最后结果应满足以下条件:①任何受益部门所承担的费用,要小于该部门单独举办工程(或相应的等效替代工程)的费用。②各受益部门分担的费用要不大于该部门在工程有效运行期内可获得的效益。③各受益部门分担的费用一般不应小于该部门的可分离费用。

(欧阳华)

zonghe liyong shuiku jingliu tiaojie

综合利用水库径流调节 (runoff regulation of comprehensive utilization reservoir)

根据综合利用效益最大的原则,协调各水资源用户的矛盾,制定相应水库运行方式的原则与方法。水电站除有发电效益以外,有的水库有防洪、防凌、灌溉、航运、供水、养殖、环保等综合效益。不同综合利用部门对综合利用水库的要求,主要反映在对水库各时段调节流量和库水位两方面提出要求。

综合利用各用户对径流调节的要求 各用户主要要求如下。

(1) 防洪。在汛期,洪水到来之前,库水位控制在不高干汛期限制水位,即在该水位以上预留一定的防洪库容,以容蓄洪水。汛期限制水位,一般为固定值,有时也可根据洪水在汛期不同时段(如月或数十天)的洪水规模不同,而有不同数值。

(2) 防凌。北方河流在凌汛期,对控制下泄流量有一定限制。

(3) 灌溉及供水(对城乡生活、生产供水)。主要是对流量及取水高程的要求。灌溉用水集中在灌溉季节。灌溉或供水有从库中引水及库下游引水之分。从库中引走的流量不能发电,从下游引用的流量,其不大于发电流量的部分可同时用来发电。

(4) 航运。要求一定的航深,有时还要求流速及流量的变率不大于某一限值。若为库区航运,要求库水位不低于航运要求的高程。若为下游航运,则要求在航运期泄放足够的流量,以保持下游航深,该泄量中不大于发电流量部分可兼用于发电。对调峰水电站,为使下游

昼夜都保持一定的航深,宜保持一定的基流,或在水电站下游修一个反调节水库。有时对水电站的日调节的程度作一定的限制。

(5) 过木、过鱼。在鱼类产卵和漂木季节,要求从水库放水通过鱼道和筏道。这部分流量不能用来发电。

(6) 养殖。在库区鱼类养殖和收获(或捕捞)季节要求库水位不低于或不高于某高程。

(7) 环境保护。为避免在水库中出现浅水区,防止钉螺和疟蚊滋生,在某些季节对库水位有一定要求。为稀释下游河道中有害物质的浓度,则对水库放水流量有一定要求。这部分流量,不大于发电流量的部分,可与发电结合。

水量平衡及径流调节计算 为解决各综合利用用户与发电的矛盾,在径流调节计算中,一般根据水资源的情况及各综合利用部门的特点,拟定各种可能的方案,并按各综合利用部门的设计保证率,选择各相应的水文代表年(或代表段),进行水量平衡和径流调节。在计算中,各综合利用用户的要求,表现在流量和水位(或相应的库容)的约束条件上。若约束条件有矛盾,或不能全部满足,则应按各综合利用用户要求设计保证率,从大到小依次满足,对保证率较小的用户,降低其满足的程度(含保证率及对水位及流量的要求)。综合利用方案的选择,是在综合利用径流调节的基础上,确定各方案发电及各综合利用用户的效益;然后按综合利用费用分摊的原则,进行费用分摊,并据以分别进行各综合利用用户的经济分析;在这个基础上进行该综合利用工程经济分析,从而选择综合利用方案。

(朱藻文)

zuankong baopo

钻孔爆破 (drill blasting) 用凿岩设备钻孔,装填炸药爆破,以破碎岩体的施工技术。钻孔爆破包括钻孔、装药和起爆3道工序。

钻孔 工程施工中,钻孔的位置、孔径和孔深视所采用的炸药性能、爆破方法等决定。一般孔径越大,炸药直径也越大,炮孔间距也可加大。在同等条件下钻孔爆破效果主要取决于最小抵抗线(见洞室爆破)长度。最小抵抗线越大,爆落方量也越大。两个炮孔之间距离一般均大于最小抵抗线长度,但太大时炮孔之间的岩体将形成凸坎。在预裂爆破、光面爆破或要求保留岩体比较平整的炮孔间距,一般小于最小抵抗线长度。对浅孔凿岩常用手风钻,对深孔常用潜孔钻。较小的石方开挖中,在缺乏钻孔机械时,也有用锤击钢钎凿孔。

装药 钻孔内装药方法,根据结构要求可分人工或机械装药两种。①人工装药。将炸药按设计装药结构制成药卷,通常各国都有标准成品药卷,中国的2号岩

石硝铵炸药药卷有 $\phi 32$ mm、 $\phi 35$ mm、 $\phi 38$ mm,药量100,150,200 g三种。在清理检查钻孔后用木质炮棍将药卷徐徐送入孔内。②机械装药。用专门的气动装药器将药卷或粉状、粒状炸药装入钻孔,有喷射式、压入式或联合式等型式。炮孔装药后,留有孔口堵塞段用特制炮泥或砂土堵塞。堵塞长度不够,将影响爆破效果。

起爆 炮孔起爆主要有:①明火起爆。用点火器点燃导火索,使导火索的火花引爆火雷管,由火雷管再引爆炸药的起爆方法。这种方法操作简单,费用省,除有瓦斯或矿尘爆炸危险的地下工程外,一般小量爆破均可使用,但安全性较差。②电力起爆。依靠电源的一定电流通过导线使电雷管引爆再引爆炸药的起爆方法。连接成电爆网络可以同时起爆很多炮孔。使用延期电雷管可以控制不同炮孔的起爆时间,在起爆前还可用仪表检测整个起爆网络,保证起爆的可靠性,适用于各种爆破工程。③导爆索起爆。不需要复杂的电爆网络或检测设备,只用少量雷管引爆导爆索传爆炸药的起爆方法。若要延期分段爆破,只需配备相应的继爆管不必使用延期雷管。④导爆管起爆。是20世纪70年代开始发展的新型非电起爆技术。用激发枪或雷管引爆导爆管内壁涂敷的高敏感性炸药,再引爆炸药内的雷管,然后引爆炸药的起爆方法,适用于各种钻孔爆破工程。⑤气管起爆。在爆破现场将可燃气体(甲烷)与氢气和氧气混合充入塑料管中,用引爆器点燃,混合气体以3000 m/s爆速使雷管引爆,然后引爆炸药的起爆方法。由于充气操作繁琐,只宜在露天爆破中采用。⑥激光起爆。由激光发生器供能,光导纤维传输,激光引爆雷管再引爆炸药的起爆方法。

(王守道)

zuankong jixie

钻孔机械 (drilling machine) 在岩土或混凝土中钻凿孔眼的施工设备。水电工程施工中进行地质钻探、地基处理、设置锚筋(束)、或用钻爆法(即钻孔、装炸药进行爆破的施工方法)进行石方开挖时均需钻孔。进行此种作业的机械有各种凿岩机、凿岩台车、钻孔机及其辅助设备。一般情况,凿岩机适用于钻凿小直径孔眼,钻孔机适于钻凿大直径孔眼。

凿岩机 按照工作动力可分为风动凿岩机、液压凿岩机、电动凿岩机和内燃凿岩机等四种。

风动凿岩机 又称风钻。它是以压缩空气为动力,使钻头对岩石产生频繁冲击,将岩石破碎而实现钻进。按照架持方式,风动凿岩机可分为手持式、气腿式、导轨式等几种。

(1) 手持式凿岩机。常用在中硬或坚硬岩石中钻孔,用人工手持钻凿向下的、水平的或倾斜的孔,钻孔

孔径 34~42 mm, 孔深一般为 4m 左右。

(2)气腿式凿岩机。主要用在中硬以上岩石中钻凿水平的和倾斜的孔。其特点是使用可伸缩的气腿来支撑和推进凿岩机工作,减轻操作工人的劳动强度,提高钻进效率。

(3)导轨式凿岩机。主要与单柱导轨或钻孔台车配套,一般并采用动力推进装置,用在中硬以上岩石中钻孔,钻孔孔径 40~80 mm,孔深 15~40 m。

液压凿岩机 由液压冲击器、液压转钎机构和蓄能器三部分组成。它与风动凿岩机相比,具有钻进速度快、动力消耗低、噪声小等优点,20 世纪 70 年代以来发展很快,在大型石方明挖与洞挖工程中与各种凿岩台车相配套,得到越来越广泛的应用。

电动凿岩机 以电动机驱动,使钎杆冲击与回旋,完成钻孔作业。它在可靠性、耐久性、安全性及使用维修方面不如风动凿岩机,在水利水电工程中采用不多。

内燃凿岩机 以汽油发动机、压气机、凿岩机组成一体的手持式凿岩工具,适用于无电源和无压缩空气的施工场所。

凿岩台车 可分为掘进台车和露天凿岩台车等两类。

掘进台车 也称多臂钻车。主要用于地下岩石洞室掘进时钻凿炮孔和锚杆孔等孔眼。由台车底盘、钻臂、推进器、风动或液压凿岩机和操纵系统等组成。钻孔孔径 50~150 mm,孔深 20~30 m。掘进台车按行走装置可分为轮胎式、轨轮式和履带式三种。每个台车可配置多台钻臂和凿岩机,根据开挖断面的大小来选择不同等级的钻臂与臂数,并配以相同等级的凿岩机。

露天凿岩台车 主要用于露天石方开挖和露天矿开采时钻凿炮孔等孔眼。一般由台车底盘、钻臂、推进器、凿岩机和操纵系统等组成。按行走装置可分为轮胎式和履带式两种。台车的钻臂一般均为单臂。凿岩机可以配用风动导轨式凿岩机或液压凿岩机。

钻孔机 按照破碎岩石的方式,可分为潜孔钻机、

冲击钻机和回转钻机等数种。

潜孔钻机 一种回转冲击式钻机,由冲击器、钻具、推压和回转机构、支架等组成。一般与履带式或轮胎式底盘车相配套。由于潜孔钻机的冲击器是直接潜入孔底进行钻凿岩石,所以冲击功的传递损失很小,钻进效率高,噪声也较低,在钻凿深孔时,效果尤为显著。它适用于钻凿孔径较大的中、深炮孔,孔径为 80~250 mm,孔深一般为 15~20 m。

冲击式钻机 适用于土层、砂砾层和局部岩层的垂直钻孔作业。采用曲柄连杆机或卷筒,通过钢丝绳将钻头提升一定高度后自由下落,利用钻头的自重冲击孔底,使岩体破碎而进行钻进。在水利水电工程中常应用于打井与防渗墙的造孔。钻孔直径一般为 800~1200 mm,钻井深度一般为 120~180 m。

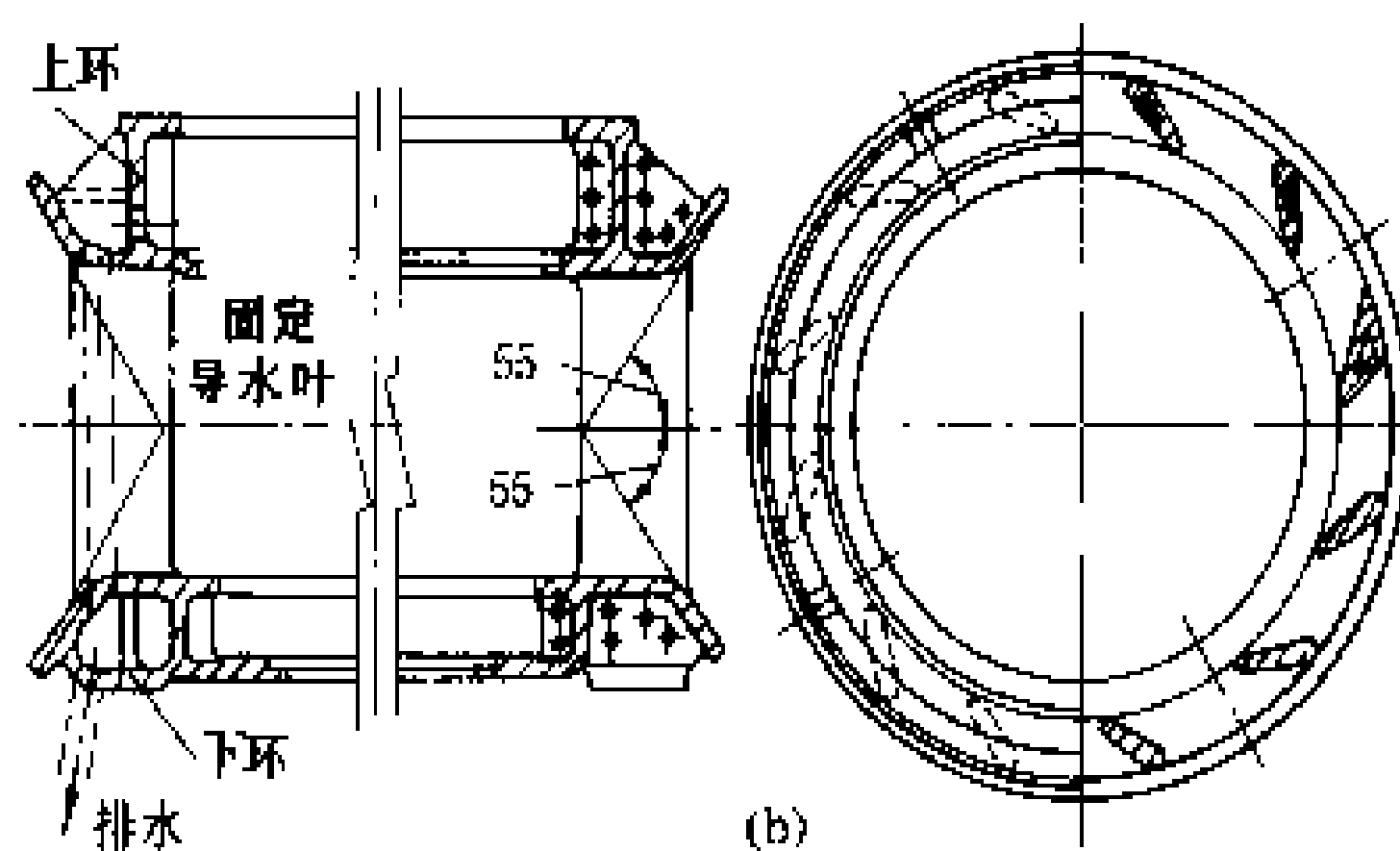
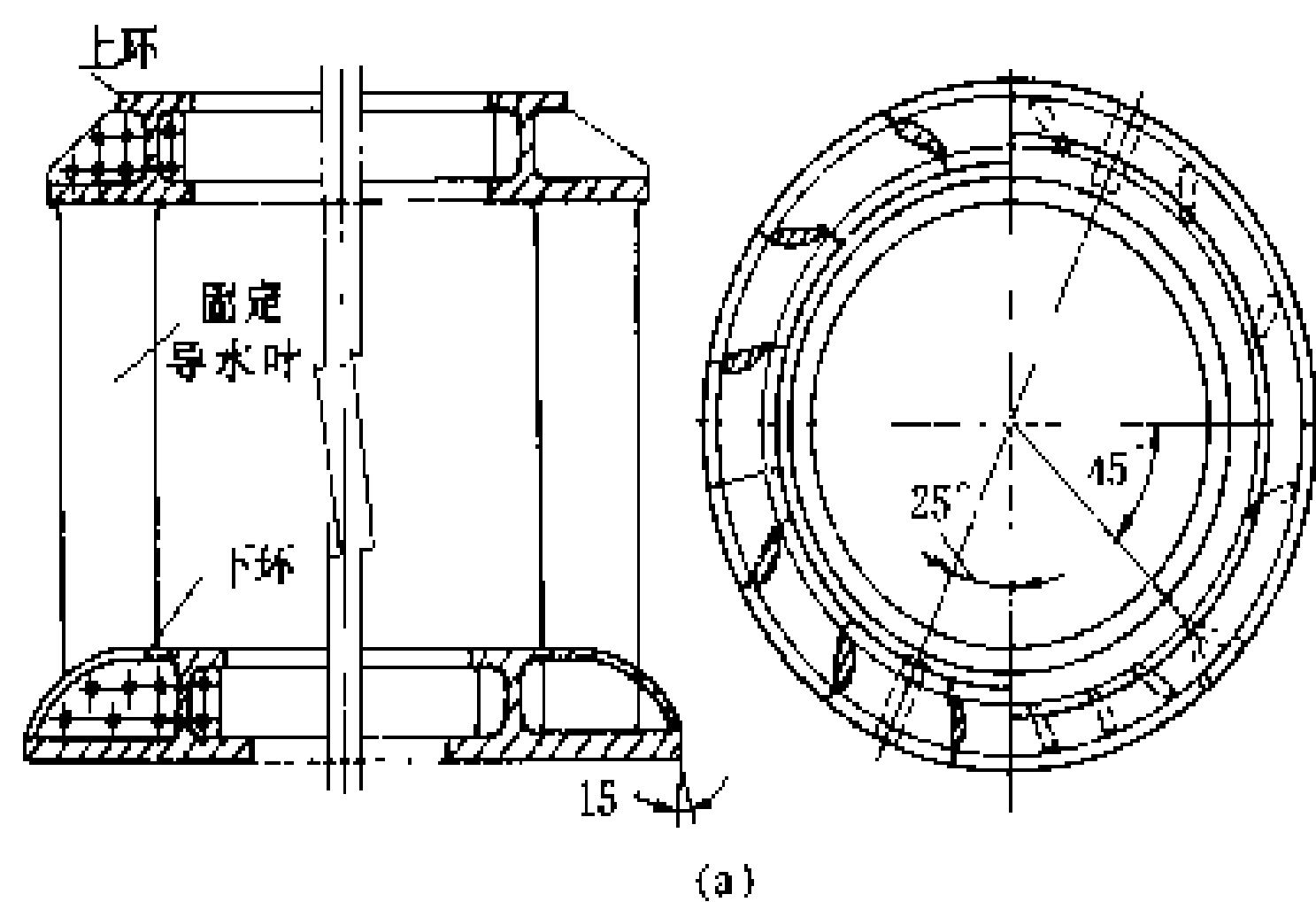
地质钻机 利用钻具一面回转一面下压,以切割、克入、挤压和研磨岩石的作用使岩石破碎的一种回转式钻机。此种钻机可适用于各种硬度岩石,还可钻斜孔和深孔,并可取出岩芯,广泛应用于地质钻探与基础处理工程。按其结构特点的不同,一般可分为油压式钻机、转盘式钻机及手把式钻机等几种型式。钻孔直径一般为 58.5~190 mm,钻孔深度可达数百米至千米。

(龚贵煮)

zuohuan

座环 (stay ring) 反击式水轮机的基础部件。外圆和蜗壳相接,内圆和顶盖、底环及基础环相连。大、中型竖轴机组的座环承受机组的重量、蜗壳上部混凝土的重量、水轮机的水推力及蜗壳的内水压力,因此要求有足够的强度和刚度。

座环由上环、下环和固定导水叶组成。主要分为:①与混凝土蜗壳连接的座环[见图(a)]有整体和支柱式两种,前者刚度好,便于安装调整,后者的上环与固定导水叶采用装配式,没有下环,固定导水叶的下端直接埋在混凝土中,便于加工、运输,节约用材,一般只



座环结构

(a) 与混凝土蜗壳连接的整体座环; (b) 与金属蜗壳连接的座环



在大型水轮机上采用。②与金属蜗壳连接的座环[见图(b)]有带蝶形边和无蝶形边两种,前者是常用的传统结构,后者上下环为箱形结构,刚度好,与蜗壳的连接点靠近固定导水叶中心,改善了受力条件,便于组焊,成本低。两者水力性能无明显差别。

固定导水叶可取活动导水叶数的一半或相等,沿圆周均布,也可按等强度原则在高水头金属蜗壳的进

口附近和混凝土蜗壳非蜗形部分靠鼻端区域酌加1~2个。固定导水叶断面形状根据水力和强度计算确定。为了顶盖自流排水,可将几个固定导水叶设计成空心的。座环采用铸钢铸造或铸焊结构,也有全部用钢板焊接的。受运输限制可分成两半或多瓣,用螺钉组合。

(吴次光)

条目汉字笔画索引

说 明

- 一、本索引供读者按条目标题的汉字笔画查检条目。
- 二、条目标题按第一字的笔画由少到多的顺序排列，笔画数相同的字按起笔笔形一（横）、丨（竖）、丿（撇）、丶（点）、㇀（折，包括乚ㄣ等）的顺序排列。第一字相同的，依次按后面各字的笔画数和起笔笔形顺序排列。
- 三、用罗马数字、阿拉伯数字、拉丁字母、斯拉夫字母和希腊字母开头的条目标题依次排在汉字开头的条目标题的后面。
- 四、参见条（虚条）的页码采取虚实条兼注的方式，即参见条页码在括号外，被参见条页码在括号内。

<div>一画</div> <div>[一]</div>			
一个半断路器接线	553	土方开挖	477
<div>二画</div> <div>[一]</div>		土石方开挖机械	487
二滩水电站	96	土石方压实机械	489
十三陵抽水蓄能电站	291	土石坝	482
厂用电电源	39	土石坝材料现场试验	484
厂用电负荷	40	土石坝施工	485
厂用电备用电源自动投入	39	土石坝原型观测	487
厂用电接线	41	土石料开采	489
厂房采暖	38	土石料现场碾压试验	491(484)
厂房通风	38	土石料填筑	490
<div>[丿]</div>		土动力学	477
人工骨料	265	土压力	494
入库洪水	265	土体加固	491
<div>三画</div> <div>[一]</div>		土体应力应变分析	493
三门峡水利枢纽	269	土体液化	493
三分之四断路器接线	268	土体稳定性	492
三峡水利枢纽	270	土的力学性质	474
土力学	180	土的工程分类	473
土工合成材料	178	土的压实	475
土工取样	479	土的固结与沉降	473
土工试验	480(480)	土的原位测试	476
土工原型观测	480	工作闸门	125
土工模型试验	478	工作容量	124
		工程地质评价	119
		工程地质图	122
		工程地质学	122
		工程地质试验	121
		工程地质测绘	117
		工程地质监测	117
		工程地质钻探	124
		工程地质勘察	118
		工程测量	115
		工程测量仪器	116
		大化水电站	60
		大古力水电站	59
		大甲溪梯级水电站	60
		大坝安全管理与监测	55
		大坝维修	56
		大屋拍水蓄能电站	61
		大渡河水运规划	58
		万安水电站	498
		万家寨水利枢纽	498
		<div>[丨]</div>	
		小水包	515
		小浪底水利枢纽	513
		<div>[丶]</div>	
		广州拍水蓄能电站	135
		<div>四画</div> <div>[一]</div>	
		丰满水电站	104
		开关站	203
		开敞式进水口	202
		天生桥一级水电站	464
		天生桥二级水电站	463
		大荒坪抽水蓄能电站	461
		天然建筑材料勘察	462
		天然骨料	462
		云峰水电站	569
		专项迁建	596
		扎戈尔斯克拍水蓄能电站	572

五强溪水电站	508	水电站厂房	314	水库淹没实物指标	370
支墩坝	576	水电站工程规划	320	水库淤积	371
区域性三	263	水电站水库优化调度	338	水库群补偿径流调节	366
比转速	24	水电站公用设备自动 控制	322	水轮发电机	380
[1]		水电站计算机监控 系统	327	水轮发电机水内冷	393
中央控制室	587	水电站计算机辅助 设计	326	水轮发电机电晕	384
中国大中型水电站	577	水电站生产成本	337	水轮发电机机架	385
中国早期水电站	586	水电站出力	318	水轮发电机安装	382
水力发电	372	水电站机电设备运行 管理	326	水轮发电机导轴承	383
水力学	376	水电站过电压保护	323	水轮发电机励磁	391
水力相似原理	375	水电站压缩空气系统	342	水轮发电机转子	396
水力要素量测	377	水电站年运 行费	336(337)	水轮发电机转子动 平衡	397
水力监测	375	水电站自动化	347	水轮发电机转动惯量	395
水土流失	437	水电站自动电压控制	346	水轮发电机转速	395
水工金属结构维修	355	水电站自动发电控制	346	水轮发电机定子	384
水工建筑物	350	水电站设计水头	337	水轮发电机空气冷却	391
水工建筑物原型观测	351	水电站防火	318	水轮发电机组不对称 运行	398
水工结构抗震试验	353	水电站进水口	333	水轮发电机组动力 特性	399
水工结构破坏模型 试验	355	水电站运行方式	344	水轮发电机组自动 控制	408
水工结构静力模型 试验	352	水电站投资	341	水轮发电机组进相 运行	400
水工结构模型试验	353	水电站财务分析	313	水轮发电机组空载 试验	400
水工结构模型试验相似 理论	354	水电站供水系统	323	水轮发电机组带负荷 试验	398
水工结构模型试验量测 技术	354	水电站油系统	343	水轮发电机组轴线 调整	408
水工混凝土	349	水电站经济分析	334	水轮发电机组振动	407
水工模型试验	356	水电站经济评价	335	水轮发电机组启动试 运行	401
水下混凝土施工	449	水电站效益	342	水轮发电机组效率 试验	404
水下爆破	448	水电站通信	339	水轮发电机组调相	402
水口水电站	359	水电站排水系统	336	水轮发电机组调峰	402
水丰水电站	349	水电站接地系统	331	水轮发电机组调频	402
水文计算	442	水电站照明	316	水轮发电机组停机 制动	403
水文地质	440	水电站照度	345	水轮发电机轴电流	395
水文地质试验	439	水头	437	水轮发电机氟里昂 与水冷	385
水文地质测绘	439	水动力学	348	水轮发电机绝缘等级	390
水文自动测报系统	447	水位观测	438	水轮发电机继电保护	388
水文学	444	水位流量关系	438	水轮发电机推力轴承	394
水文资料	447	水系	447	水轮发电机基本电气 参数	385
水文站网	446	水库	360	水轮发电机组基础	387
水文调查	412	水库工程地质勘察	365	水轮机	409
水文预报	445	水库下游河道冲刷	368		
水文勘测	443	水库水文泥沙观测	367		
水文频率分析	443	水库回水	365		
水击	357	水库初期蓄水	363		
水击模型试验	358	水库变动回水区	362		
水轮枢纽	309	水库诱发地震	371		
水电站	311	水库调度图	363		
水电站厂内经济运行	316	水库淹没处理	368		

水轮机飞速转速 416

水轮机水压脉动 421

水轮机主轴 427

水轮机出力 414

水轮机吸出高度 423

水轮机安装 411

水轮机安装高程 413

水轮机导轴承 415

水轮机运转特性曲线 426

水轮机汽蚀和磨损 420

水轮机层 414

水轮机单位参数 414

水轮机相似理论 424

水轮机特征水头 422

水轮机效率 425

水轮机流量 418

水轮机调速器 422

水轮机排出高度 419

水轮机综合特性图 427

水轮机静平衡 417

水轮机模型试验 418

水轮机额定转速 416

水质 449

水泥 436

水泵水轮机 308

水射流 436

水资源综合利用 450

水流阻力 378

水流挟沙能力 378

水能利用优化 430

水能利用学 429

水能经济 428

水能资源 433

水跃 449

水静力学 358

[J]

气压 258

气体绝缘金属封闭电器 256

气象要素 257

气温 257

升船机 280

长江水系水能资源 36

长江宜宾—宜昌段水电
规划 37

化学灌浆 152

反滤层 100

分期围堰导流 103

风 106

丹江口水利枢纽 62

乌江水电规划 507

乌江渡水电站 506

乌斯特-伊里姆水电站 507

凤滩水电站 106

[、]

计算力学 176

[→]

引水式水电站 561

引水防沙 559

引水系统 562

引水系统充水 563

引水明渠 561

引水明管 560

引水隧洞 561

巴斯康蒂抽水蓄能电站 6

孔口出流 210

以礼河梯级水电站 556

双母线接线 306

双重调节 305

五画

[一]

正常蓄水位 575

世界大水电站 296

古田溪梯级水电站 129

古里水电站 128

古河道 128

节理 183

可能最大洪水 206

可能最大暴雨 205

石方开挖 292

布拉茨克水电站 30

龙羊峡水电站 231

龙溪河梯级水电站 230

平面闸门 254

平面控制测量 254

东风水电站 89

东江水电站 90

[1]

卡博拉巴萨水电站 201

电力电量平衡 80

电气一次设备安装 85

电气二次设备安装 82

电气主接线 87

电气设备 84

电气量测量 83

[J]

丘吉尔瀑布水电站 261

白山水电站 19

外加剂 497

[、]

主厂房 592

主厂房机电设备布置 594

主厂房起吊设备 595

主变压器布置 591

立式水轮发电机 224

[→]

辽河水系水能资源 227

加拿大水能资源 178

边界层 26

发电机电压侧接线 99

发电机层 99

发电机-变压器组接线 98

六画

[一]

动库容 91

地下厂房开挖 71

地下工程围岩 73

地下工程施工支护 72

地下工程施工安全与
防护 72

地下水 76

地下式厂房 74

地下建筑物原型观测 74

地区电源及水电发展
规划 70

地形测量 77

地应力 77(77)

地应力测试 77

地质年代 80

地质构造 79

地球物理勘探 69

地貌 68

地震 78

地震危险性分析 79

地震烈度 78

亚洲水能资源 535

机墩 175

过坝设施 136

西洱河梯级水电站 510

压力上升率 531

压力前池 530

压力管道 530

有效应力原理 564

死水位 451

[|]

光面爆破	134
光弹性试验	134
同步系统	469
回填灌浆	160

[)]

年发电量	248
年输沙量	248
伊泰普水电站	554
伊犁河水系水能资源	554
全息散斑水工结构模型 试验	264
伞式水轮发电机	272(224)

[、]

冲击式水轮机	45
冲沙闸	46
冰川	27
冰坝	27
冰凌	28
冰情观测	28
冰塞	29
刘家峡水电站	227
产状	35
羊卓雍湖抽水蓄能电站	551
灯泡式水轮发电机	67
江夏潮汐电站	179
汛期限制水位	529
安娜波利斯潮汐试验 电站	3
安康水电站	2
设计年径流	276
设计洪水	275
设计洪水过程线	275
设计洪水位	276(181)

[→]

导水机构	66
导火索	64
导流明渠	65(65)
导流泄水建筑物	65
导流隧洞	65(65)
导爆索	64
导爆管	64
异重流	557
防飞逸措施	100
防抬机措施	101
防洪高水位	100

防洪调度	100(146)
红水河水电规划	144

七画
[一]

进口阀	189
进水闸	189
远方跳闸装置	569
远动	568
运输机械	570
坝	6
坝区泥沙淤积	14
坝内式厂房	13
坝内管	13
坝式水电站	16
坝式进水口	15
坝后式厂房	10
坝后背管	9
坝址	17
坝址工程地质勘察	18
坝身泄水孔	15
坝线	16
坝型选择	16
坝基	10
坝基稳定	12
均衡母线接线	198
克拉斯诺雅尔斯克水 电站	206
材料力学	32
李家峡水电站	223
连拱坝	226

[|]

时历法径流调专	293
围堰	500
岗南抽水蓄能电站	110

[)]

伸缩节	277
岔管	34
狄诺维克抽水蓄能电站	68
角形接线	181

[、]

库区综合开发	215
库底清理	214
沥青混凝土施工	226
沙波运动	273
沙溪口水电站	273
汽蚀系数	258

泥沙池	44
启闭机	256

[→]

层流	33
尾水位	502
尾水渠	502
尾水隧洞	502
尾水管	501
局部放电分析	196
阿尔托格索抽水蓄能 电站	1

八画
[一]

环境保护设计	152
环境监测	153
环境影响	153
环境影响评价	155
环境影响评价方法	156
青铜峡水利枢纽	260
抽水蓄能电站	46
抽水蓄能发电电动机	48
抽水蓄能发电电动机 继电保护	50
抽水蓄能机组起动 方式	51
顶盖	89
势流	301
拉丁美洲水能资源	218
拉格朗德二级水电站	218
拦污栅	219
松花江水电规划	452
卧式水轮发电机	505
事故闸门	302
欧洲水能资源	251
转轮	597
转轮公称直径	598
转速上升率	598
软基处理	265
软基勘察	266

[|]

非电气量测量	101
非洲水能资源	102
明渠不恒定流	241
明渠水力学	242
明湖抽水蓄能电站	240
明潭抽水蓄能电站	243
固体力学	131
固结灌浆	130

岸边式厂房	3
岸边溢洪道	4
岸坡式进水口	5
岸塔式进水口	5
岩土体蠕动	550
岩石	538
岩石力学	542
岩石力学性质	543
岩石工程数值分析	541
岩石边坡	540
岩石地基	541
岩石坝基处理	540(536)
岩体力学性质现场 试验	547
岩体力学性质 试验	547(543)
岩体风化	546
岩体位移监测	548(549)
岩体软弱结构面	548
岩体结构	546
岩体原位观测	549
岩体模型试验	547
岩体稳定性	548
岩基处理	536
岩溶	537(200)
岩滩水电站	545
岩塞爆破	537
岩爆	535
图库鲁伊水电站	472

[J]

径流	190
径流式水电站	191
径流系列人工生成	195
径流调节	192
径流随机模型	191
金沙江水电规划	186
金属结构安装	187
受困容量	302(337)
鱼道	565
备用容量	23

[、]

变压器-线路组接线	26
底环	68
闸门	572
羊母线接线	63
单位吸水量	64
泄水闸	523
泄水建筑物	519
泄水建筑物原型观测	523

泄水建筑物维修	522
泄洪闸门	519
泄洪隧洞	518
河床式厂房	138
河流规划	139
河流泥沙	140
河流泥沙物理性质	142
河道测量	139
油压装置	564
泥石流	248
泥沙沉降速度	246
泥沙淤积	246
泥沙起动流速	247
泥沙模型试验	247
波浪	29
宝珠寺水电站	20
定向爆破	89
空化	208
空化试验	208
空蚀	209
空腹坝	207
实验应力分析	296

[丩]

弧形闸门	149
承压水	45
降水	180
贯流式水轮机	132

九画

[一]

拱坝	126
拱座稳定	127
挑流鼻坎	469
柘溪水电站	574
砌石坝	259
砂砾石地基灌浆	274
轴流式水轮机	589

[丨]

竖井开挖	302
竖井式进水口	302

[丿]

重力坝	588
保证出力	21
信号系统	527
急流	176

[、]

施工工厂设施	286
--------------	-----

施工对外交通	285
施工场内交通	282
施工交通运输	287
施工设计洪水	288
施工导流	283
施工供电	287
施工总布置	288
施工总进度	289
施工测量	282
施工期渡汛	287
闽江水系水能资源	240
美国水能资源	239
苏联水能资源	452
炸药	573
洪水	144
洪水调节	146
洪水调查	146
洪水预报	149
洪水演进	148
洞室爆破	92
测速装置	32

[丩]

怒江水系水能资源	250
结构力学	184
结构可靠度	184
结构优化	185
绝缘油色谱分析	197

十画

[一]

珠江水系水能资源	590
盐锅峡水电站	550
桥形接线	259
校核洪水位	181

[丨]

贤永滩水电站	188
鸭绿江水系规划	531
鸭绿江水系中国部分 水能资源	532
圆筒阀	567

[丿]

钱塘江水系水能资源	259
钻孔机械	601
钻孔爆破	601
航空摄影测量	137
脆性材料水工结构模型 试验	53

[、]

高含沙水流	112
高速水流	112
高程	111
高程控制测量	111
座环	602
离差系数	222
紊流	503
粉煤灰	104
消力池	512
消力岸	513
涡流	504
海河水系水能资源	137
流体力学	230
流变学	228
流量测验	229
涌水	564
朗斯潮汐电站	220
调节保证	465
调压阀	466
调压室	467
调速器调节规律	466

[→]

预应力混凝土施工	567
预裂爆破	566
预填骨料压浆混凝土 施工	566
预想出力	566(337)
继电保护	177

十一画

[一]

球阀	262
理论力学	224
推移质泥沙	494
接入系统设计	182
接触灌浆	182
接缝灌浆	182
控制电缆	210
控制电源	211
控制系统	213
控制性进度	214
掘进机开挖	198
掺气水流	35
掺和料	34
基斯洛潮汐试验电站	175
勘测设计技术标准	204
勒丁顿抽水蓄能电站	221
黄河上游水电规划	158

黄河中游水电规划	160
黄河水系水能资源	159
萨扬-舒申斯克水 电站	268
检修闸门	179
检修容量	179(80)
梯级水电站	458
梯级水电站集中控制	461
梯段爆破	458
副厂房	107
副厂房布置	108(107)
龚嘴水电站	125

[1]

悬式水轮发电机	529(224)
悬移质泥沙	529
帷幕	501
帷幕灌浆	501
坝塌	24

[J]

铜街子水电站	471
移民安置	555
偏差系数	253
船闸	52
斜井开挖	517
斜流式水轮机	518
脱水段	495
猫跳河梯级水电站	236

[、]

断层	94
断面测量	95
新流围堰渗流	94
断裂力学	94
清污机	261
混合式水电站	161(561)
混流式水轮机	161
混凝土	161
混凝土工程施工	165
混凝土坝施工	162
混凝土坝原型观测	164
混凝土拌和	165
混凝土制备	172
混凝土质量控制	173
混凝土面板堆石坝	169
混凝土骨料	167
混凝土养护	172
混凝土浇筑机械	168
混凝土配料	170
混凝土温度控制	170

淮河水系水能资源	152
深孔式进水口	278
渗透变形	280
渗流	278
渗流水电比拟法	279
渗流控制	278
密云抽水蓄能电站	239

[→]

弹性力学	457
随机水文过程	451
综合利用工程费用 分摊	599
综合利用水库径流 调节	600

十二画

[一]

塔式进水口	457
堰流	551
散体力学	272
葛洲坝水利枢纽	113
裂隙	227(183)
雅西雷塔水电站	534
雅砻江水电规划	533
雅鲁藏布江水系水能 资源	533

[1]

喀斯特	200
黑龙江水系中国部分 水能资源	142

[J]

短路电流	93
栈道	99
鲁布革水电站	233

[、]

装机容量	599
湘西沅澧水电规划	510
湿度	291
渭源水电站	503
溃坝洪水	216
滑坡	151
富春江水电站	108

[→]

发河岩水电站	114
缓流	158

十三画
[一]

摄影测量 276
蒸发 575
雷管 222

[丨]

跨流域引水发电规划 215
蜗壳 504

[丿]

锚喷 237
遥感 552
鲍古昌水电站 21

[、]

新丰江水电站 526
新安江水电站 524
新高濂川抽水蓄能电站 527
新奥地利隧洞施工法 525
数理统计法径流调节 303
塑性力学 453
溢流式厂房 559
溢流坝 558

[ㄣ]

叠梁 88

十四画
[一]

静库容 196(91)
碧口水电站 25
截流 185
模板 244

[丿]

管道水力学 131

[、]

漫湾水电站 235

[ㄣ]

隧洞开挖 454

十五画
[一]

碾压混凝土坝 249
碾压混凝土施工 249

[丨]

暴雨 22
暴雨调查 22

蝴蝶阀 150

[丿]

镇墩 575

[、]

潮汐电站 42
潘家口抽水蓄能电站 252
澜沧江中下游水电规划 220
澜沧江水系水能资源 219

十六画
[、]

褶皱 573

十九画
[、]

爆炸力学 23

二十画
[、]

灌浆 133
灌浆机械 134
灌浆试验 134(133)

条 目 外 文 索 引

(INDEX OF ARTICLES)



additive 497
 admixture 34
 aerated flow 35
 aero-photogrammetry ... 137
 air cooling of hydrogener-
 ator 391
 Alto - goso Pumped Stor-
 age Power Station 1
 analysis of partial dis-
 charge 196
 ancestral river course 128
 anchorage block 575
 anchoring and shot-
 crete 237
 angle-type connection
 scheme 181
 Ankang Hydropower
 Station 2
 Annapolis Experimental
 Tidal Power Station 3
 annual operational costs of
 hydropower station ... 336
 annual output of
 energy 248
 annual sediment yield ... 248
 arch dam 126
 arrangement in auxiliary
 power house 108
 aseismic test of hydrau-
 lic structure 353
 atmospheric pressure 258
 atmospheric tempera-
 ture 257
 attitude 35
 automatic control for auxi-
 liaries of hydropower
 station 322
 automatic control of water
 turbine generator
 set 408

automatic generation con-
 trol for hydropower
 station 346
 automatic switching of
 station service auxiliary
 power supply 39
 automatic system of hydro-
 logical data acquisition
 and transmission 447
 automatic voltage control
 of hydropower
 station 346
 automation of hydropower
 station 347
 auxiliary power house of
 hydropower station ... 107
 available output 566
 axial flow turbine 589






backfill grouting 160
 backwater of reservoir ... 365
 Baishan Hydropower
 Station 19
 balance-bus connec-
 tion 198
 balances of electric power
 and energy 80
 Baozhushi Hydropower
 Station 20
 basic electrical parameters
 of hydrogener-
 ator 385
 Bath County Pumped Stor-
 age Power Station 6
 bed load 494
 bench blasting 458
 bifurcated pipe 34
 Bikou Hydropower
 Station 25
 bitumen concrete construc-
 tion 226



Boguchang Hydropower
 Station 21
 bottom ring 68
 boundary layer 26
 bracket of hydrogener-
 ator 385
 braking of water turbine
 generator set 403
 Bratsk Hydropower
 Station 30
 bridge-type connec-
 tion 259
 bulb hydrogenerator 67
 bulkhead gate 179
 buried river course 128
 butterfly valve 150
 buttress dam 576

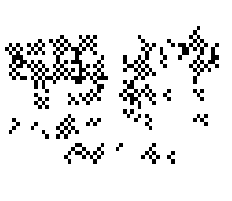
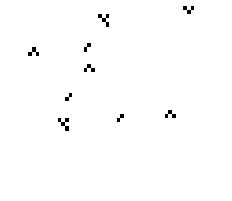


Cabora Bassa Hydro-
 power Station 201
 cascade hydropower
 station 458
 cavitation 208
 cavitation and wear of
 water turbine 420
 cavitation erosion 209
 cavitation model test 208
 cement 436
 central control room 587
 centralized control of
 cascade hydropower
 stations 461
 CFRD 169
 chamber blasting 92
 characteristic head of
 water turbine 422
 chemical grouting 152
 Churchill Falls Hydro-
 power Station 261
 clean-up of reservoir
 site 214

- coefficient of cavi-
tation 258
- coefficient of skew-
ness 253
- coefficient of variation ... 222
- cofferdam 500
- commissioning test of
water turbine gener-
ator set 401
- communication of hydro-
power station 339
- compacting machine for
earth-rock filling 489
- compensating operation of
water turbine generator
set 402
- compensating runoff regu-
lation of reservoirs
group 366
- complete diversion 94
- composite type hydro-
power station 161
- comprehensive develop-
ment of reservoir 215
- comprehensive utilization
of water resources 450
- compressed air system
of hydropower
station 342
- computational mechan-
ics 176
- computer aided design for
hydropower station ... 326
- computerized supervisory
and control system for
hydropower station ... 327
- concrete 161
- concrete aggregate 167
- concrete batching 170
- concrete curing 172
- concrete dam construc-
tion 162
- concrete face rockfill
dam 169
- concrete mixing 165
- concrete placing ma-
chine 168
- concrete preparation 172
- concrete quality con-
trol 173
- concrete temperature
control 170
- concrete work construc-
tion 165
- confined water 45
- consolidation and settle-
ment of soil 173
- consolidation grouting ... 130
- construction access 285
- constructional plant and
facilities 286
- construction cost alloca-
tion of multi-purpose
project 599
- construction design
flood 288
- construction diversion ... 283
- construction general
layout 288
- construction survey 282
- construction transpor-
tation 287
- contact grouting 182
- control cable 210
- control power source 211
- control system 213
- corona of hydrogener-
ator 384
- creeping of rock mass
and soil mass 550
- crushed aggregate 265
- curtain 501
- curtain grouting 501
- cylindrical gate 567
- 
- Dahua Hydropower
Station 60
- Dajiaxi Cascade Hydro-
power Stations 60
- dam 6
- dam axis 16
- dam-break flood 216
- dam foundation 10
- dam intake 15
- dam site 17
- dam type hydropower
station 16
- Danjiangkou Hydro-
project 62
- dead water level 451
- dehydrated section of
river 495
- density current 557
- Deriaz turbine 518
- design annual runoff 276
- designed flood hydro-
graph 275
- design flood 275
- design head of hydro-
power station 337
- design of environmental
protection 152
- detonating fuse 64
- detonator 222
- Dinorwic Pumped Storage
Power Station 68
- directed water cooling of
hydrogenerator 393
- directional blasting 89
- disabled capacity 302
- discharge measure-
ment 229
- discharge of water
turbine 418
- discharge ring 68
- dispatching for flood
control 100
- dispatching graph of
reservoir 363
- distributor 66
- diversion channel 65
- diversion channel 561
- diversion outlet struc-
ture 65
- diversion pipe 560
- diversion tunnel 65
- diversion tunnel 561
- diversion type hydropower
station 561
- Dongfeng Hydropower

- Station 89
- Dongjiang Hydropower Station 90
- double-bus connection ... 306
- double regulation 305
- draft tube 501
- drainage system of hydro-power station 336
- drain height of water turbine 419
- drill blasting 601
- drilling machine 601
- dynamic characteristic of water turbine generator set 399
- dynamic rotor balance of hydrogenerator 397
- dynamic storage volume of reservoir 91
- 
- earlier hydropower stations in China 586
- earth and rock excavation 489
- earth and rock excavation machinery 487
- earth and rockfill dam construction 485
- earth and rock filling 490
- earth excavation 477
- earthing system for hydro-power station 331
- earth pressure 494
- earthquake 78
- earthquake intensity 78
- economic analysis of hydro-power station 331
- economic benefit of hydro-power station 342
- economic evaluation for hydropower station ... 335
- efficiency of water turbine 425
- efficiency test of water turbine generator set 404
- elasticity 457
- electrical connection on generator voltage side ... 99
- electrical equipment 84
- electro-hydrodynamic analogy for seepage ... 279
- elevation 111
- embankment dam 482
- emergency gate 302
- engineering classification of soil 473
- engineering geological drilling 124
- engineering geological evaluation 119
- engineering geological investigation 118
- engineering geological investigation for dam site 18
- engineering geological investigation for reservoir 365
- engineering geological mapping 117
- engineering geological test 121
- engineering geologic map 122
- engineering geologic monitoring 117
- engineering geology 122
- engineering survey 115
- engineering surveying instrument 116
- environmental impact 153
- environmental impact assessment 155
- environmental monitoring 153
- erection of water turbine 411
- erection of hydrogenerator 382
- erection of primary electrical circuit equipment 85
- erection of secondary electrical circuit equipment 82
- Ertan Hydropower Station 96
- evaporation 575
- excavation by tunnel boring machine 198
- expansion 277
- expected output 566
- experimental stress analysis 296
- explosive 573
- 
- facilities for passage over dam 136
- fault 94
- Fengman Hydropower Station 104
- Fengtian Hydropower Station 106
- financial analysis of hydro-power station 313
- fire protection in hydro-power station 318
- firm power 21
- fishway 565
- fissure 227
- flip bucket 469
- flood discharge gate 519
- flood forecasting 149
- flood investigation 146
- flood protection in construction period 287
- flood regulation 116
- flood routing 148
- floods 144
- fluctuating backwater region of reservoir 362
- fluid mechanics 230
- fly ash 104
- fold 573
- fore bay 530
- form 244
- foundation of hydro-generator 387

- fracture mechanics 94
- Francis turbine 161
- freon cooling of hydro-
generator 385
- frequency regulating of
water turbine gener-
ator set 402
- Fuchunjiang Hydropower
Station 108
- 
- Gangnan Pumped Storage
Power Station 110
- gas chromatographic anal-
ysis of insulating oil ... 197
- gas insulated metal en-
closed switchgear 256
- gate 572
- Geheyang Hydropower
Station 114
- general schedule of con-
struction 289
- generating capacity 124
- generator floor 99
- generator/motor for
pumped storage
power station 48
- generator pier 175
- generator-transformer
block scheme 98
- geological structure 79
- geological time 80
- geomorphy 68
- geophysical exploration ... 69
- geostress 77
- geosynthetics 478
- geotechnical model
test 478
- Gezhonba Hydropro-
ject 113
- glacier 27
- Gongzui Hydropower
Station 125
- Grand Coulee Hydro-
power Station 59
- Grand Maison Pumped
Storage Power
Station 61
- gravity dam 588
- groundwater 76
- grouting 133
- grouting machine 134
- grouting test 134
- Guangzhou Pumped Stor-
age Power Station 135
- guaranteed power 21
- guide bearing of hydro-
generator 383
- guide bearing of water
turbine 415
- Guri Hydropower
Station 128
- Gutianxi Cascade Hydro-
power Stations 129
- 
- head cover 89
- highist flood control
water level 100
- high-velocity flow 112
- hoist equipment of ma-
chine house 595
- hoisting machine 256
- hollow dam 207
- holography and speckle
technique in hydraulic
structural model test ... 264
- horizontal control
survey 254
- horizontal shaft hydro-
generator 505
- humidity 291
- hydraulic concrete 349
- hydraulic generator 380
- hydraulic jump 449
- hydraulic model test 356
- hydraulic monitoring 375
- hydraulic resistance 378
- hydraulics 376
- hydraulic structural model
test 353
- hydraulic structural model
test for brittle mate-
rials 53
- hydraulic structure 350
- hydraulic turbine 409
- hydrodynamics 348
- hydrogenerator 380
- hydrogenerator exci-
tation 391
- hydrogeological map-
ping 439
- hydrogeological test 439
- hydrogeology 440
- hydrological computa-
tion 442
- hydrological data 447
- hydrological fore-
casting 445
- hydrological frequency
analysis 443
- hydrological investiga-
tion 442
- hydrological network 446
- hydrological survey 443
- hydrology 444
- hydrometry of reser-
voir 367
- hydropower 372
- hydropower complex 309
- hydropower development
planning in interbasin
water transfer
project 215
- hydropower development
planning of Dadu
river 58
- hydropower development
planning of Hongshui
river 114
- hydropower development
planning of Jinsha
river 186
- hydropower development
planning of Songhua
river 452
- hydropower development
planning of the middle
and lower reaches of
Langcang river 220
- hydropower development

planning of the middle reaches of Huanghe (Yellow) river	160	Hyaihe river system ...	152	power station	345
hydropower development planning of the upper reaches of Huanghe (Yellow) river	158	hydropower resources of Huanghe (Yellow) river system	159	improvement of soil mass	491
hydropower development planning of the Yibin-Yichang reach of Changjiang (Yangtze) river	37	hydropower resources of Ili river system	554	impulse turbine	45
hydropower development planning of Wujiang river	507	hydropower resources of Lancang river system	219	incipient velocity of sediment	247
hydropower development planning of Xiangjiang, Zishui, Yuanjiang and Lishui rivers	510	hydropower resources of Latin America	218	inclined shaft excavation	517
hydropower development planning of Yalong river	533	hydropower resources of Liaohe river system	227	inlet valve	189
hydropower development planning of Yalu river	531	hydropower resources of Minjiang river system	240	in - situ compacting test for earth and rock materials	491
hydropower economics	428	hydropower resources of Nujiang river system	250	in-situ instrumentation in soil engineering	480
hydropower project planning	320	hydropower resources of Qiantang river system	259	in-situ instrumentation of rock mass	549
hydropower resources ...	433	hydropower resources of USA	239	in-situ material test for earth and rockfill dam	484
hydropower resources of Africa	102	hydropower resources of USSR	452	in-situ soil test	476
hydropower resources of Asia	535	hydropower resources of Yalujiang river system within China	532	in-situ test for mechanical properties of rock mass	547
hydropower resources of Canada	178	hydropower resources of Yarlungzangbo river system	533	installation elevation of water turbine	413
hydropower resources of Changjiang (Yangtze) river system	36	hydropower resources of Zhujiang (Pearl) river system	590	installed capacity	599
hydropower resources of Europe	251	hydropower station	311	insulation class of hydrogenerator	390
hydropower resources of Haihe river system	137	hydrostatics	358	intake of hydropower station	333
hydropower resources of Heilong river system (within China)	142	hyper-concentrated flow	112	intake sluice	189
hydropower resources of				inter connection with power system	182
		ice	28	inverted filter	100
		ice dam	27	investment in hydropower station	341
		ice jam	29	Itaipu Hydropower Station	554
		ice regime observation	28		
		illumination of hydro-		Jiangxia Tidal Power Station	179
				Jinshuitan Hydropower Station	188
				jobsite transportation for construction	282
				joint	183

joint grouting 182



karst 200, 537

key work schedule 214

Kislaya-Guba Experimental Tidal Power Station 175

Krasnoyarsk Hydropower Station 206



La Grande 2 Hydropower Station 218

laminar flow 33

land fall 24

land slide 151

large and medium sized hydropower stations in China 577

large hydropower stations in the world 296

layout of electrical and mechanical equipment in main hall 594

layout of main transformers 591

loading power factor operation of water turbine generator set 400

lighting for hydropower station 346

Lijiaxia Hydropower Station 223

liquefaction of soil mass 493

Liujiaxia Hydropower Station 227

Longxihe Cascade Hydropower Stations 230

Longyangxia Hydropower Station 231

Lubuge Hydropower Station 233

Ludington Pumped Storage Power Project 221



main electrical connection scheme 87

main hall of power plant 592

main shaft of water turbine 427

maintenance and repair of dam 56

maintenance and repair of water release structure 522

maintenance of hydraulic metallic structure 355

management and monitoring of dam safety ... 55

Manwan Hydropower Station 235

Maotiaohe Cascade Hydropower Stations 236

masonry dam 259

material indexes of reservoir inundation 370

measurement of electrical quantities 83

measurement of geostress 77

measurement of hydraulic parameters 377

measurement of non-electrical quantities 101

measuring technique for hydraulic structural model test 354

mechanical properties of rock 543

mechanical properties of soil 474

mechanics of explosion ... 23

mechanics of granular media 272

metallic structure installation 187

meteorological elements ... 257

methods of environmental impact assessment 156

Minghu Pumped Storage

Power Station 240

Mingtian Pumped Storage

Power Station 243

Miyun Pumped Storage

Power Station 239

model test of hydraulic

structural failure 355

model test of rock

mass 547

model test of water

turbine 418

monitoring of rock mass

displacement 548

motor starting method

for pumped storage

unit 51

mud and debris flow 248

multiple arch dam 226



NATM 525

natural aggregate 462

natural construction ma-

terial investigation 462

New Austrian Tunnelling

Method 525

no-load test of water

turbine generator

set 400

nominal runner diam-

eter 598

nominal speed of water

turbine 116

nomography of water

turbine 427

normal storage water

level 575

numerical analysis in rock

engineering 541






oil pressure system 564

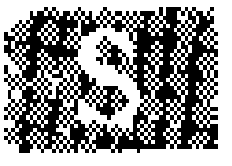
oil supply system of hy-



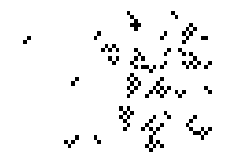
dropower station 343

one and a half breakers

scheme 553

- one and a third breakers
connection 268
- on-load test of water
turbine generator
set 398
- open channel hydrau-
lics 242
- open intake 202
- operational mode of hy-
dropower station 344
- operation management of
mechanical and electrical
equipment in hydro-
power station 326
- optimal economic oper-
ation of hydropower
station 316
- optimization in hydro-
power utilization 430
- optimization of struc-
tures 185
- optimized operation for
reservoir of hydro-
power station 338
- orifice flow 210
- outlet in dambody 15
- output of hydropower
station 318
- output of water
turbine 414
- overflow dam 558
- overflow type power
house 559
- overvoltage protection for
hydropower station ... 323
- 
- Panjiakou Pumped Storage
Power Station 252
- peak load regulation of
water turbine gener-
ator set 402
- Pelton turbine 45
- penstock 530
- penstock buried in dam ... 13
- penstock on downstream
face of the dam 9
- performance curve of
water turbine 426
- photoelasticity test 134
- photogrammetry 276
- physical properties of
river sediment 142
- pipeline hydraulics 131
- plane gate 254
- plasticity 453
- PMF 206
- PMP 205
- potential flow 301
- power house at dam
toe 10
- power house heating 38
- power house of hydro-
power station 314
- power house on river
bank 3
- power house ventila-
tion 38
- power house within the
dam 13
- power supply for con-
struction 287
- precipitation 180
- prepacked concrete con-
struction 566
- presplit blasting 566
- pressure fluctuation of
water turbine 421
- pressure rise ratio 531
- prestressed concrete con-
struction 567
- preventive measures against
siltation in diversion
work 559
- primacord 64
- primacord tube 64
- principle of effective
stress 561
- principles of hydraulic
similitude 375
- probable maximum
flood 206
- probable maximum
precipitation 205
- production cost of hydro-
power station 337
- protection measures from
upward thrust 101
- protection measures from
runaway 100
- prototype observation for
concrete dam 164
- prototype observation for
earth-rockfill dam 487
- prototype observation for
hydraulic structure 351
- prototype observation for
underground structure ... 74
- prototype observation for
water release struc-
ture 523
- pumped storage power
station 46
- pump - turbine 308
- 
- Qingtongxia Hydro-
project 260
- 
- raft passage way 99
- rainstorm 22
- Rance Tidal Power
Station 220
- regional electric generation
and hydropower develop-
ment planning 70
- regional soil 263
- regulation guarantee 465
- regulation law of gov-
ernor 466
- regulation of runoff 192
- relay protection 177
- relay protection of gener-
ator/motor for pumped
storage power station ... 50
- relay protection of hydro
generator 388
- relief valve 466
- relocation and reconstruc-
tion of special

- projects 596
 remote sensing 552
 repairing capacity 179
 reserved capacity 23
 reservoir 360
 reservoir induced earth-
 quake 371
 reservoir inflow flood 265
 reservoir initial filling ... 363
 reservoir sedimen-
 tation 371
 resettlement of inhabit-
 ants 555
 restricted water level
 in flood period 529
 rheology 228
 ring gate 567
 river closure 185
 river closure diversion 94
 river course survey 139
 river degradation at
 downstream of
 reservoir 368
 river planning 139
 river sediment 140
 river system 447
 rock 538
 rock burst 535
 rock excavation 292
 rock foundation 541
 rock mechanics 542
 rock plug blasting 537
 rock slope 540
 roller bucket 513
 roller compacted concrete
 construction 249
 roller compacted concrete
 dam 249
 rotary valve 262
 rotational inertia of hydro-
 generator 395
 rotational speed of hydro-
 generator 395
 rotor of hydrogener-
 ator 396
 runaway speed of water
 turbine 416
 runner 597
 runoff 190
 runoff regulation by
 mathematical statistics
 method 303
 runoff regulation by time
 series method 293
 runoff regulation of com-
 prehensive utilization
 reservoir 600
 run-of-river hydropower
 station 191

 safety and protection of
 underground works 72
 sand-gravel foundation
 grouting 274
 sand wave motion 273
 Sanmenxia Hydropro-
 ject 269
 Sayano-Shushensk Hydro-
 power Station 268
 science of hydropower
 utilization 429
 scouring sluice 46
 section survey 95
 sedimentation in dam
 area 14
 sediment measure-
 ment 246
 sediment model test 247
 sediment settling ve-
 locity 246
 sediment transport ca-
 pacity 378
 seepage 278
 seepage control 278
 seepage deformation 280
 seismic hazard evalu-
 ation 79
 selection of dam type 16
 service gate 125
 settling basin 44
 shaft excavation 302
 shaft intake 302
 shaft line alignment of
 water turbine gener-
 ator set 408
 shaft's current of hydro-
 generator 395
 Shaxikou Hydropower
 Station 273
 Shin Takasegawa Pumped
 Storage Power
 Station 527
 ship lift 280
 ship-lock 52
 Shisanling Pumped Stor-
 age Power Station 291
 short circuit current 93
 Shuifeng Hydropower
 Station 349
 Shuikou Hydropower
 Station 359
 side spillway 4
 signalling system 527
 similitude theory of water
 turbine 424
 single-bus connection 63
 siol foundation explor-
 ation 266
 slope intake 5
 sluice barrage 523
 small hydropower 515
 smooth blasting 134
 soil compaction 475
 soil dynamics 477
 soil mechanics 480
 soil sampling 479
 soil test 480
 solid mechanics 131
 solution cavern of
 rock 537
 specific speed 24
 specific water absorp-
 tion 64
 speed measuring device ... 32
 speed rise ratio 598
 spherical valve 262
 spillway tunnel 518
 spiral case 504
 stability of arch dam
 abutment 127

- | | | |
|---|---|---|
| stability of dam founda-
tion 12 | switching substation 203 | trash rack 219 |
| stability of rock mass 548 | switchyard 203 | trashrack cleaning
machine 261 |
| stability of soil mass 492 | synchronization
system 469 | treatment of reservoir
inundation 368 |
| stage-discharge rela-
tion 438 | synthetic generation of
runoff series 195 | treatment of rock dam
foundation 540 |
| stage diversion 103 |  | treatment of rock foun-
dation 536 |
| stage observation 438 | tailwater channel 502 | treatment of soft dam
foundation 265 |
| static balancing of water
turbine 417 | tailwater level 502 | tubular turbine 132 |
| static model test of hy-
draulic structure 352 | tailwater tunnel 502 | Tucurui Hydropower
Station 472 |
| static storage volume of
reservoir 196 | Tainter gate 149 | tunnel excavation 454 |
| station service load 40 | technical standard for
investigation and
design 204 | tunnelling 454 |
| station service power
connection 41 | telecontrol 568 | turbine floor 414 |
| station service power
supply 39 | teletripping device 569 | turbulent flow 503 |
| stator of hydrogener-
ator 384 | temporary support for
underground works 72 |  |
| stay ring 602 | test for mechanical prop-
erties of rock mass 547 | umbrella type hydro-
generator 272 |
| stilling basin 512 | theoretical mechanics 224 | unbalanced operation of
water turbine gener-
ator set 398 |
| stochastic model of
runoff 191 | theory of similitude in
hydraulic structural
model test 354 | underground hydropower
house 74 |
| stochastic hydrological
process 454 | Three - Gorge Hydro -
project 270 | underground powerhouse
excavation 71 |
| stoplog 88 | thrust bearing of hydro-
generator 394 | underwater blasting 448 |
| storm investigation 22 | Tianhuangping Pumped
Storage Power
Station 461 | underwater concrete con-
struction 449 |
| straflo turbine 132 | Tianshengqiao 2 Hydro-
power Station 163 | unit parameter of water
trubine 414 |
| strength of materials 32 | Tianshenqiao 1 Hydro-
power Station 461 | unsteady flow in open
channel 241 |
| stress-strain analysis of
soil mass 493 | tidal power station 42 | upper water level for
flood control 100 |
| structural mechanics 184 | Tongjiezi Hydropower
Station 471 | Ust - Ilim Hydropower
Station 507 |
| structural reliability 184 | topographic survey 77 |  |
| structure of rock mass ... 546 | tower intake 457 | vertical control survey ... 111 |
| sub-critical flow 158 | tower intake at bank
side 5 | vertical hydrogener-
ator 224 |
| submerged intake 278 | transformer-line block
scheme 26 | vibration of water turbine
generator set 407 |
| suction height of water
turbine 423 | transportation ma-
chine 570 | |
| super-critical flow 176 | | |
| surge chamber 467 | | |
| surrounding rock of under-
ground engineering 73 | | |
| suspended load 529 | | |
| suspended type hydro-
generator 529 | | |

vortex motion	504
W	
Wan'an Hydropower Station	498
Wanjiazhai Hydroproject	498
water and soil losses	437
water conveyance system	562
water filling to diversion system	563
water guide mechanism	66
water hammer	357
water hammer model test	358
water head	437
water jet	436
water level for check flood	181
water level for design flood	276
water quality	449
water release structure	519

water retainning power house	138
water supply system of hydropower station ...	323
water surge	564
water turbine	409
water turbine governor	422
water wave	29
weak structural plane of rock mass	548
weathering of rock mass	546
weir flow	551
Weiyuan Hydropower Station	503
wind	106
Wujiangdu Hydropower Station	506
Wuqiangxi Hydropower Station	508

X

Xiaolangdi Hydroproject	513
Xi'erhe Cascade Hydro-	

power Stations	510
Xin'anjiang Hydropower Station	524
Xinfengjiang Hydropower Station	526

Y

Yacyreta Hydropower Station	534
Yamzho Yumco Pumped Storage Power Station	551
Yanguoxia Hydropower Station	550
Yantan Hydropower Station	545
Yilihe Cascade Hydropower Stations	556
Yunfeng Hydropower Station	569

Z

Zagorsk Pumped Storage Power Station	572
Zhexi Hydropower Station	574

内 容 索 引

说 明

一、本索引是全卷条目和条目内容的主题分析索引。索引主题按汉语拼音字母的顺序并辅以汉字笔画、起笔笔形顺序排列。同音时，按汉字笔画由少到多的顺序排列，笔画数相同的按起笔笔形一（横）、丨（竖）、丿（撇）、丶（点）、㇀（折，包括㇀㇁㇂等）的顺序排列。第一字相同时，按第二字，余类推。罗马数字、阿拉伯数字、拉丁字母、斯拉夫字母和希腊字母开头的主题，依次排在汉字索引主题的后面。

二、设有条目的主题用黑体字，未设条目的主题用仿宋体字。


三、索引中人名一般附有人物的生卒年或活动年代，外国人名还附有原文姓和名（或名的缩写字母）。

四、索引主题之后的阿拉伯数字是主题内容所在的页码，数字之后的小写拉丁字母表示索引内容所在的版面区域。本书正文的版面区域划分如右图。

a	d
b	e
c	f

<div><div><div><div><div><div></div></div></div><div><div><div></div></div><div><div></div></div></div><div><div><div></div></div><div><div></div></div></div><div><div><div></div></div><div><div></div></div></div><div><div><div></div></div><div><div></div></div></div></div></div><div>阿尔托格索抽水蓄能</div><div>电站 1a</div><div>艾林考特,D. (D. Erlenkorter) 433b</div><div>爱因斯坦,H. A. (H. A. Einstein) 378b</div><div>安德森,D. (D. Anderson) 433c</div><div>安定性 436e</div><div>安康水电站 2b</div><div>安娜波利斯潮汐试验电站 3b</div><div>安装间 314d</div><div>岸边副坝 7c</div><div>岸边式厂房 3e</div><div>岸边溢洪道 4b</div><div>岸冰 28d</div><div>岸坡式进水口 5b</div><div>岸式进水口 334a</div><div>岸塔式进水口 5d</div><div>暗河 200d</div><div>奥托拉诺,L. (L. Ortolano) 433c</div></div>	<div><div><div><div><div><div></div></div></div><div><div><div></div></div><div><div></div></div></div><div><div><div></div></div><div><div></div></div></div><div><div><div></div></div><div><div></div></div></div><div><div><div></div></div><div><div></div></div></div></div></div><div>巴格诺尔德(R. A. Begnold) 495c</div><div>巴斯康蒂抽水蓄能电站 6a</div><div>坝 6f</div><div>坝顶 7a</div><div>坝段 588c</div><div>坝高 7a</div><div>坝后背管 9c</div><div>坝后式厂房 10a</div><div>坝基 10f</div><div>坝基稳定 12b</div><div>坝肩 7a</div><div>坝内管 13c</div><div>坝内式厂房 13f</div><div>坝前引水管 562c</div><div>坝区泥沙淤积 14d</div><div>坝身泄水孔 15a</div><div>坝式进水口 15d</div><div>坝式水电站 16a</div><div>坝式引水系统 562e</div><div>坝体 7a</div><div>坝线 16d</div></div>	<div><div><div><div><div><div></div></div></div><div><div><div></div></div><div><div></div></div></div><div><div><div></div></div><div><div></div></div></div><div><div><div></div></div><div><div></div></div></div><div><div><div></div></div><div><div></div></div></div></div></div><div>坝型选择 16e</div><div>坝址 17c</div><div>坝址工程地质勘察 18a</div><div>坝趾 7a</div><div>坝踵 7a</div><div>耙斗式清污机 261d</div><div>白金汉(Buckingham) 354f</div><div>白山水电站 19b</div><div>半地下式厂房 75c</div><div>半贯流式水轮机 132d</div><div>半伞式水轮发电机 225a</div><div>半同步起动 51f</div><div>剥采比 265b</div><div>薄坝 127c</div><div>宝珠寺水电站 20d</div><div>保护接地 331d</div><div>保证出力 21c</div><div>鲍古昌水电站 21f</div><div>暴雨 22c</div><div>暴雨调查 22f</div><div>爆裂 64e</div><div>爆破 455a</div><div>爆破冲击波 293b</div><div>爆炸力学 23a</div></div>
---	---	--

爆震波 293b
贝尔曼,R. (R. Bellman) 317b,431a
贝克,A. (A. Barker) 411d
贝克尔,L. (L. Becker) 433c
贝伦,L. (L. Bjerrum) 474e
备用容量 **23d**
背靠背同步起动 51e
被动土压力 494b
被迫停运率 23d
本迪克森,A. (A. Bendixen) 185b
崩落孔 455f
崩塌 **24d**
比奥,M. A. (M. A. Biot) ... 474c
比表面积 436d
比转速 **24e**
彼德森,K. E. (K. E. Peterson) 492b
必需容量 599a
毕肖普,A. W. (A. W. Bishop) 565a
闭气 186a
碧口水电站 **25d**
边光显示器 528b
边角测量 254c
边界层 **26b**
边界元法 541f
变送器 84b
变态模型 247d,356e
变压器-线路组接线 **26f**
变质岩 539c
标准贯入试验 476f
标准轨距 285e
标准轨距铁路 571a
冰坝 **27b,28d**
冰川 **27d**
冰川地貌 69b
冰盖 28d
冰花 28d
冰凌 **28c**
冰期 28c
冰情 28d

冰情观测 **28f**
冰塞 **29c,28d**
冰淤 28d
波浪 **29f**
伯努利,D. (D. Bernoulli) ... 377a
泊松(S. D. Poisson)比 458a
补偿洪水调节 148d
补偿调节 194d
补充电量投资(造价) 342a
补充容量投资(造价) 342a, 342b
不间断电源 213a
布彻,W. S. (W. S. Butcher) 433b
布拉茨克水电站 **30c**
布森涅斯克,J. V. (J. V. Boussinesq) 493f
步进制自动电话交换机 341a

材料力学 **32a**
财务净现值 313f
财务内部收益率 313f
曹,C. A. (C. A. Tsou) 433c
草土围堰 500d
侧槽溢洪道 4c
测速装置 **32d**
层流 **33d**
层流边界层 26c
差动式调压室 468c
岔管 **34a**
掺和料 **34d**
掺料 226c
掺气措施 521d
掺气水流 **35b**
产状 **35f**
长江水系水能资源 **36d**
长江宜宾—宜昌段水电规划 **37e**
常压模型试验 356e
厂顶溢流式厂房 559d
厂房坝段 588f

厂房采暖 **38d**
厂房通风 **38e**
厂内生产调度通信 340f
厂前挑流式厂房 559d
厂区 314d, 316b
厂用电备用电源自动投入 ... **39c**
厂用电电源 **39f**
厂用电负荷 **40d**
厂用电继电保护 178d
厂用电接线 **41c**
厂用电设备室 108
超干硬性混凝土 249e
超静水压力 565c
超瞬态电抗 386f
潮差 42d
潮汐电站 **42b**
沉积岩 539a
沉降粒径 142b
沉沙槽 202d
沉沙池 **44b**
承压水 **45a**
程控交换机 341b
齿耙式清污机 261d
冲击-回转钻进 124a
冲击式水轮机 **45c**
冲击钻进 124a
冲沙闸 **46c**
充电机室 108b
重复利用库容 361d
抽水蓄能电站 **46d**
抽水蓄能电站电气主接线 ... 88d
抽水蓄能电站循环效率 46f
抽水蓄能电站综合效率 46f
抽水蓄能发电电动机 **48f**
抽水蓄能发电电动机继电保护 **50b**
抽水蓄能机组 409f
抽水蓄能机组起动方式 **51b**
出机温度 162f
出渣 455a
初凝 436d
船闸 **52c**
垂直防渗设施 265f

垂直升船机	281d
垂直运输	166a
春汛	145c
次生亏损	183e
次要建筑物	351a
脆性材料水工结构模型	
试验	53e
错缝	163a
	
达西(H. - P. - G.	
Darcy)定律	481c
达西,H. - P - G. (H. - P.	
- G. Darcy)	278d,
	478f,482a
大坝安全管理与监测	55a
大坝维修	56a
大渡河水电规划	58d
大古力水电站	59b
大化水电站	60a
大甲溪梯级水电站	60e
大气过电压	323f
大体积混凝土	162c
大头坝	576d
大屋抽水蓄能电站	61d
贷款偿还期	311b
电力线载波通信	339d
丹江口水利枢纽	62c
丹尼尔 (Denil) 式鱼道	565f
单级船闸	53a
单母线不分段接线	63b
单母线出线带旁路隔离	
开关接线	63f
单母线带旁路母线接线	63e
单母线分段接线	63c
单母线接线	63a
单曲拱坝	127b
单位电量成本	337e
单位电量投资 (造价)	342a
单位发电成本	337f
单位飞逸转速	417a
单位供电成本	337f
单位容量投资 (造价)	342a

单位售电成本	337f
单位吸水量	64a
单项整体模型	356d
导爆管	64c
导爆索	64e
导火索	64f
导流明渠	65a
导流隧洞	65b
导流泄水建筑物	65b
导水机构	66a
导水叶	66c
导线测量	254c
倒石堆	24d
德里亚,P. (P. Deriaz).....	518c
德里亚水轮机	518c
灯泡比	67c
灯泡贯流式水轮机	133a
灯泡式水轮发电机	67b
等额年费用	335e
等吸出高度线	427c
等效率线	427b
低坝	7c
低油压关闭导水叶试验	399b
狄诺维克抽水蓄能电站	68a
底环	68e
底流消能	520f
地表径流	190b
地貌	68f
地面摄影测量	277a
地面遥感	553c
地球静止卫星	340d
地球物理勘探	69c
地球站	340e
地区电源及水电发展规划 ...	70a
地温	257f
地下厂房开挖	71a
地下工程施工安全与防护 ...	72a
地下工程施工支护	72f
地下工程围岩	73c
地下建筑物原型观测	74b
地下式厂房	74f
地下水	76c
地形测量	77a

地应力	77d
地应力测试	77e
地震	78b
地震烈度	78f
地震危险性分析	79b
地质构造	79e
地质力学模型试验	548a
地质年代	80a
电缆层	108a
电缆室	108a
电力补偿调节	194d
电力电量平衡	80f
电力起爆	601d
包能加权平均水头	437d
电气二次设备	82e
电气二次设备安装	82e
电气量测量	83d
电气设备	84b
电气液压型调速器	423c
电气一次设备	85d
电气一次设备安装	85d
电气主接线	87d
电液转换器	423d
电站最大水头	422c
电站最小水头	422c
叠梁	88f
顶盖	89a
顶管法	478b
定床模型试验	356f
定向爆破	89d
定子非周期分量衰减时间	
常数	387b
定子绕组接地保护	389f
定子绕组匝间短路保护	389a
定子铁芯	384d
东风水电站	89e
东江水电站	90e
动床模型	247c
动床模型试验	356f
动库容	91e
动力触探	477a
动力相似	425a
动力学	224d

冻土	257f, 263f
洞室爆破	92c
斗轮式挖掘机	488c
陡槽	5a
短路比	386d
短路电流	93a
断层	94a
断层面	94a
断层线	94a
断裂力学	94d
断流围堰导流	94f
断路器失灵保护	178a
断面测量	95d
断面模型	356d
断崖	94a
堆石坝	482d
对角式水轮机	518a
多分支“分布中性点” 接线方式定子绕组短 路保护	389b
多级船闸	53a
多年调节	193e
厄索比, A. M. (A. M. Esogbue)	433b
铍式清污机	261d
恩格伦, F. (F. Engelund)	495d
恩格斯, H. (H. Engels)	357d
二滩水电站	96a
二氧化碳灭火	381c
发电机-变压器单元接线	98a
发电机-变压器扩大单元 接线	98c
发电机-变压器联合单元 接线	98d
发电机变压器组继电 保护	390c
发电机-变压器组接线	98a
发电机层	99a
发电机电压侧接线	99b

发电机-变压器单元断路器 分段接线	99d
发电机-变压器单元隔离 开关分段接线	99d
发电机-变压器单元接线	99c
发电机电压开关室	108a
发电机电压配电装置室	108a
发电机风罩	594a
发电机空载升压试验	401b
发电机三相短路试验	401a
筏道	99e
筏闸	136d
反分析	542a
反击式水轮机	410a
反滤层	100b
防冻剂	497f
防飞逸措施	100e
防洪标准	146e
防洪调度	100f
防洪高水位	100f
防洪库容	101a, 146e, 361c, 529e
防洪限制水位	529c
防雷接地	331c
防渗	279b
防抬机措施	101b
防跳跃闭锁回路	213d
非电气量测量	101d
非洲水能资源	102f
菲伦, L. N. G. (L. N. G. Filon)	135b
分期围堰导流	103d
分区坝	482c
粉煤灰	104d
丰满水电站	104f
风	106a
风能地貌	69b
封闭式堆基	501c
峰荷	344b
峰谷工作容量	124f
峰林	200e
凤滩水电站	106e
弗朗西斯, J. B. (J. B.	

Francis)	161c, 411d
弗朗西斯式水轮机	161d
弗劳德 (Froude) 数	449e
弗劳德, W. (W. Froude)	356c, 357d
伏流	200d
辐射式缆机	163e
辐向轴流式水轮机	161a
负荷备用容量	24b
附面层	26b
复合材料力学	131d
复式起爆网络	92f
副坝	7c
副厂房	107d
副厂房布置	108e
富春江水电站	108e
富尔内龙, B. (B. Fournegron)	411d
干谷	200e
干松容重	167d
钢板桩围堰	500f
钢管爆破保护装置	375c
岗南抽水蓄能电站	110a
高坝	7c
高程	111b
高程控制测量	111c
高含沙水流	112b
高速水流	112e
高压管道	530a
高压喷射注浆	491c
格兰特, E. L. (E. L. Grant)	429d
格里菲思, A. A. (A. A. Griffith)	94e
葛洲坝水利枢纽	113a
隔河岩水电站	114e
工程测量	115e
工程测量仪器	116d
工程筹建期	290c
工程地质测绘	117a
工程地质分区图	122b

工程地质监测	117c	国际土力学及基础	洪水	144f
工程地质勘察	118a	工程协会 (International	洪水调查	146a
工程地质评价	119a	Society of Soil Mechanic	洪水调节	146e
工程地质试验	121b	and Foundation Engineer-	洪水演进	148d
工程地质图	122a	ing, ISSMFE)	洪水预报	149b
工程地质学	122e	482a	后张法	567d
工程地质钻探	124a	过坝设施	厚拱坝	127c
工程结构	184c	389e	弧形闸门	149e
工程完建期	290f	过电流保护	胡克定律	457d
工程准备期	290c	390b	胡克,R. (R. Hooke)	457d
工作接地	331c	过负荷保护	湖泊	448a
工作容量	124d	390b	蝴蝶阀	150b
工作闸门	125d	过水机	滑波床	151d
工作照明	346a	136d	滑动模板	244f
龚嘴水电站	125f	过水围堰	滑坡	151d
拱坝	126e	95c, 500b	滑坡壁	151e
拱肩	126e	过速限制器	滑坡体	151d
拱形重力坝	127d	100e	滑雪道	5a
拱座	126e	谷仁, A. (A. Harzen) ...	化学灌浆	152a
拱座稳定	127f	194c	化学岩	539d
共用库容	529e	海成地貌	淮河水系水能资源	152c
构造地貌	69b	69b	环境保护设计	152d
构造节理	183e	海河水系水能资源	环境监测	153a
古河道	128d	137a	环境影响	153c
古里水电站	128e	含利成本	环境影响评价	155d
古田溪梯级水电站	129e	337e	环境影响评价方法	156b
固定式绞机	163c	奔板机	缓流	158b
固定式启闭机	256b	489d	缓凝剂	497d
固化灰浆	486c	航空摄影测量	黄河上游水电规划	158d
固结灌浆	130d	137b	黄河水系水能资源	159d
固体力学	131a	航空遥感	黄河中游水电规划	160a
管道水力学	131e	553b	黄土	263c
管涌	13a, 280b	航天摄影测量	黄土地貌	69b
贯流式水轮机	132d	277c	回填灌浆	160e
灌浆	133d	553a	回转栅式清污机	261d
灌浆机械	134c	合龙	回转钻进	124a
灌浆试验	134d	185f	混合式水电站	161a
光面爆破	134d	河床式厂房	混合型泄洪隧洞	518c
光弹性试验	134f	138c	混合照明	346c
光纤通信	340f	河床式水电站	混流式水轮机	161a
广义胡克定律	457f	16b, 312e	混凝土	161e
广州抽水蓄能电站	135c	河道测量	混凝土坝施工	162b
滚水坝	558a	139b	混凝土坝原型观测	164e
		河流		
		448a		
		河流规划		
		139e		
		河流泥沙		
		140c		
		河流泥沙物理性质		
		142a		
		黑龙江水系中国部分水能		
		资源		
		142e		
		恒定导引时间		
		470b		
		恒定导前相角		
		470b		
		恒定流的均匀流		
		242d		
		恒定流的均匀流		
		242d		
		横道图		
		289f		
		横向谷坝址		
		17d		
		横向围堰		
		500b		
		红水河水电规划		
		144a		
		红土		
		263d		
		虹吸溢流坝		
		558a		

混凝土拌和	165c
混凝土拌和系统	172e
混凝土工程施工	165e
混凝土骨料	167b
混凝土浇筑机械	168e
混凝土料罐车运输	169a
混凝土面板堆石坝	169f
混凝土配料	170e
混凝土熟料	283b
混凝土温度控制	170f
混凝土养护	172a
混凝土制备	172d
混凝土质量控制	173d
活性指标	34f
	
几何相似	424c
机墩	175a
机房	592d
机械液压型调速器	423a
机械运动	224b
机组出力限制线	427d
机组过速度试验	401b
机组型式试验	402b
基本烈度	79a
基荷	344b
基坑	94f
基流	190b
基斯洛潮汐试验电站	175e
激光起爆	601e
激光全息技术	264d
吉布拉特, R. (R. Gibrat)	433b
级配	167e
急流	176b
集水面积	448a
集鱼船	136e
挤密砂桩	491d
计算机为辅监控系统	328c
计算机为主监控系统	328c
计算机系统软件	327a
计算力学	176e
计算水头	337b

技术可开发资源	433f
季 (年) 调节	193e
继电保护	177a
加拿大水能资源	178f
伽利略, G. (G. Galileo) ...	32b
坚岩坝基	11a
间接水锤	531d
间接水击	357f
检修备用容量	24c
检修容量	179c
检修闸门	179c
减水剂	497b
减压模型试验	356e
剪切模量	457f
剪胀性	475c
简单式调压室	468b
碱活性骨料	168d
江厦潮汐电站	179f
浆河	112d
降水	180d
交轴超瞬态电抗	386f
交轴瞬态电抗	386f
交轴同步电抗	386e
角形接线	181a
铰接式重力坝	588d
校核洪水位	181e
接触电位差	331d
接触电压	331d
接触灌浆	182a
接缝灌浆	182c
接力器	66f
接人系统设计	182e
揭河底	112d
节理	183d
结构动力学	184f
结构新裂和疲劳理论	185a
结构静力学	184e
结构可靠度	184a
结构力学	184c
结构稳定理论	184f
结构优化	185c
截流	185e
截水碑	279b

解炮	484e
界限含水量	473c
金沙江水电规划	186e
金属结构	187d
金属结构安装	187d
紧水滩水电站	188e
进口阀	189d
进水闸	189e
经济净现值	335c
经济可开发资源	434b
经济内部收益率	335b
井式溢洪道	4d
径流	190b
径流补偿调节	194d
径流发电	191c
径流式水电站	191c
径流随机模型	191f
径流调节	192f
径流系列人工生成	195b
净水头	437b
静库容	196d
静力触探	477a
静力学	224c
静止变频器起动	52b
静止土压力	494b
镜板	395a
局部放电分析	196e
局部照明	346b
卷扬式启闭机	256b
绝缘油色谱分析	197b
掘进机开挖	198c
均衡母线接线	198f
均质坝	482e
	
喀斯特	200a
喀斯特地貌	69b
卡博拉巴萨水电站	201d
卡门涡	421e
卡普兰式水轮机	590a
卡普兰, V. (V. Kaplan)	411c, 590a
卡斯蒂利亚诺, A. (A. Castilian)	

Castigliano)	131b, 185a
卡特维利什维利, И. А. (И. А. Картвэли)	194f
开敞式进水口	202b
开关站	203a
凯珀, J. (J. Kuiper)	433c
勘测设计技术标准	204a
柯乃普, R. T. (R. T. Knapp)	209f
柯西, A. L. (A. - L. Cauchy)	131b, 457d
科克尔, E. G. (E. G. Coker)	135b
颗粒级配	473b
可能最大暴雨	205c
可能最大洪水	206b
可逆式水泵水轮机	308a
可调出力	124e
可调电量	124e
可调容量	124e
克拉斯诺雅尔斯克水 电站	206e
克里茨基, С. И. (С. И. Крицкий)	194e
克罗斯, H. (H. Cross) ...	185b
空腹坝	207e
空腹拱坝	207f
空腹重力坝	207f
空化	208c
空化试验	208f
空蚀	209d
空蚀率	209e
孔口出流	210b
控制电缆	210f
控制电源	211d
控制段	4e, 520a, 518e
控制系统	213c
控制性进度	214c
控制闸门	125d
枯洪比	95c
库底清理	214e
库仑, С. - А. de (С. - А. de Coulomb)	131b,

273a, 481f, 494c	
库区综合开发	215a
库容系数	193e
跨步电位差	331d
跨步电压	331e
跨孔波速试验	477b
跨流域电力补偿径流 调节	366e
跨流域引水发电规划	215e
快速闸门	302b, 573b
宽缝	163b
宽缝重力坝	588d
宽尾墩	558e
溃坝洪水	216d
拉布采维兹, L. V. (L. V. Rabczewicz)	525f
拉丁美洲水能资源	218a
拉格朗德二级水电站	218d
拉格朗日, J. L. (J. L. Lagrange)	242a
拦河坝	7c
拦沙坎	202d
拦污栅	219c
澜沧江水系水能资源	219c
澜沧江中下游水电规划	220a
朗肯, W. J. M. (W. J. M. Rankine)	273b, 482a, 494c
朗斯潮汐电站	220e
勒丁顿抽水蓄能电站	221c
雷电过电压	323f
雷管	222b
雷诺方程	504b
雷诺, O. (O. Reynolds)	33d, 208c, 209a, 357d, 503f
雷诺数	33e
冷缝	163a
离差系数	222f
离散元法	541f
李家峡水电站	223b
理论力学	224b

理论蕴藏量	433e
立堵	186b
立式水轮发电机	224e
励磁调节器	392f
利特尔, J. D. C. (J. D. C. Little)	194f, 433b
沥青混凝土施工	226b
连拱坝	226f
辽河水系水能资源	227d
裂隙	227c
临界水头	337b
临时水工建筑物	351a
刘家峡水电站	227c
流变学	228f
流冰	28d
流动法则	454a
流量测验	229b
流量差积曲线	294f
流水地貌	69a
流体力学	230a
流土	13a, 280b
流网	278f, 301f
流域	448a
流域面积	448a
龙口	185f
龙溪河梯级水电站	230f
龙羊峡水电站	231f
鲁布革水电站	233a
螺杆式启闭机	256b
落差	437b
落水洞	200d
马略特, E. (E. Mariotte) ...	457d
马西, P. (P. Massee)	433b
麦克斯韦, J. C. (J. C. Maxwell)	185a
漫湾水电站	235a
盲谷	200e
猫跳河梯级水电站	236b
毛水头	437b
锚冰	28d
锚喷	237d

美国水能资源	239a
米滕, L. G. (L. G. Mitten)	433b
密云抽水蓄能电站	239c
面板坝	482e
面流消能	521b
灭磁	393d
闽江水系水能资源	240b
敏感性分析	335e
明湖抽水蓄能电站	240e
明火起爆	601d
明凯旦, M. X. (M. X. Менксль)	194e
明渠不恒定流	241e, 242d
明渠恒定流	242d
明渠水力学	242e
明潭抽水蓄能电站	243a
模板	244b
磨损	420e
莫尔, O. (O. Mohr)	32b
莫林, T. L. (T. L. Molin)	133b
莫罗佐夫, A. A. (A. A. Морззов)	195a
母线继电保护	177e
木笼围堰	500f
.....	
纳维, C. L. M. H. (C. - L. - M. - H. Navier)	32b, 185a, 157d
内部过电压	324a
内均衡母线接线	199d
内桥形接线	260b
能见度	257e
泥浆截水墙	266a
泥沙测验	246a
泥沙沉降速度	246f
泥沙模型试验	247c
泥沙起动流速	247f
泥石流	248b
倪克勤, C. H. (C. H. Шикитин)	195a

逆断层	94b
逆掩断层	94b
年不平衡系数	345a
年发电量	248e
年经营成本	337f
年生产成本	337c
年输沙量	248f
年消落水位	451e
碾压混凝土坝	249b
碾压混凝土施工	249d
牛顿, I. (I. Newton) ...	377a
牛顿第二定律	224c
怒江水系水能资源	250a
.....	
欧拉, L. (L. Euler)	32b, 131b, 411d
欧文, G. R. (G. R. Irwin)	94e
欧洲水能资源	251a
.....	
帕森斯, C. A. (C. A. Parsons)	209a
帕斯卡, B. (B. Pascal)	377a
排水	279c
排水垫层	561c
排水固结	491c
排水幕	588f
潘家口抽水蓄能电站	252a
旁压试验	177b
炮眼	458c
佩尔顿, L. A. (L. A. Pelton)	45f, 111e
佩尔顿式水轮机	46a
喷出岩	538f
喷射混凝土	238b
膨胀剂	497f
膨胀土	263e
偏差系数	253f
平板坝	576d
平堵	186b

平衡力系	224c
平面控制测量	254a
平面闸门	254f
平行移动式缆机	163e
平移断层	94b
坡立谷	200e
普朗特, L. (L. Prandtl) ...	26c
普列什科夫, Я. Ф. (Я. Ф. Плешков)	194f
普罗克特, R. R. (R. R. Proctor)	476a
.....	
启闭机	256a
起爆体	486c
起爆药	222b
气垫式调压室	467e, 468f
气管起爆	601e
气体绝缘金属封闭电器	256e
气温	257d
气象要素	257e
气压	258a
气压高程测量	112a
弃水	191c
弃水调峰	191e
弃土	477f
汽蚀	120b
汽蚀系数	258c
砌石坝	259a
钱塘江水系水能资源	259d
戕堤	185e
强电控制	214a
强夯	491d
强迫弃水电量	191e
桥形接线	259f
侵入岩	538c
青铜峡水利枢纽	260e
倾角	36a
倾向	36a
清沟	28d
清污机	261d
丘吉尔瀑布水电站	261e
球阀	262d

球形岔管	34d
区域性土	263c
屈服条件	153f
渠道衬砌	561b
取土	477f
全贯流式水轮机	133a
全球定位系统	254c, 254f
全伞式水轮发电机	225a
全息散斑水工结构模型	
试验	264a
	
扰动土样	479d
人工电话交换机	311a
人工骨料	265a
日（或周）负荷电量累积	
曲线	124f
日负荷率	344b
日调节	193e
日照	257f
日最小负荷率	344b
溶洞	200d
溶斗	200d
溶沟	200d
溶蚀洼地	200e
蠕变	229a
人库洪水	265b
软基处理	265e
软基勘察	266d
软岩坝基	11a
弱电控制	214a
弱电选线控制	214b
	
萨瓦连斯基, А. Л. (А.	
Д. Саваренски)	194f
萨扬-舒申斯克水电站	268a
萨兹里, S. (S. Sazilly)	7f
三分之四断路器接线	268f
三机式机组	50a
三角测量	254c
三角高程测量	111f
三梁岔管	34c
三门峡水利枢纽	269c

三峡水利枢纽	270d
三圆心拱坝	127c
伞式水轮机	272f
散斑干涉技术	264d
散体力学	272f
沙波运动	273b
沙莫夫, Г. И. (Г. И.	
Шамов)	495e
沙溪口水电站	273e
砂的容胀	167e
砂砾石地基灌浆	274c
山崩	24d
山洪	145f
上游防渗铺盖	265f
上游铺盖	279c
上游引水段	518e
上游引水渠	4e
设计洪水	275a
设计洪水过程线	275d
设计洪水位	276a
设计年径流	276a
摄影测量	276e
伸缩节	277e
深层搅拌	491f
深孔式进水口	278a
渗流	278c
渗流控制	278f
渗流水电比拟法	279d
渗透变形	280a
升船机	280d
升鱼机	136e
生物岩	539d
圣维南, D. (De Saint	
Venant)	242a
失励磁保护	390b
施工测量	282c
施工场内交通	282f
施工导流	283d
施工对外交通	285d
施工工厂设施	286a
施工供电	287a
施工合水量	485d
施工交通运输	287d

施工期渡汛	287f
施工设计洪水	288b
施工总布置	288f
施工总进度	289e
湿度	291c
湿式凿岩	72d
十三陵抽水蓄能电站	291e
十字板剪切试验	476f
石方洞挖	293a
石方开挖	292f
石方明挖	293a
石林	200d
石芽	200d
时历法径流调节	293c
实体重力坝	588d
实验应力分析	296a
世界大水电站	296f
势流	301d
事故备用容量	23d
事故闸门	302a
事故照明	346b
视比重	167d
受阻容量	302d, 337d
梳齿	104a
疏竣	478a
束水墙	202d
竖井开挖	302d
竖井式进水口	302f
竖直抓斗式清污机	261d
数理统计法径流调节	303b
数字式仪表	84a
双重调节	305e
双斗式水轮机	45f
双母线带专用旁路断路器	
器的双母线带旁路母	
线接线	307e
双母线接线	306f
双母线带专用旁路断路器	
接线	307d
双排机组坝后式厂房	10b
双曲拱坝	127b
双室式调压室	468c
水泵水轮机	308a

水池式鱼道	565f	水电站自动发电控制	346e	水力发电站	311f
水锤	465f, 531c	水电站自动化	347b	水力监测	375d
水电枢纽	309a	水动力学	348b	水力相似原理	375e
水电站	311f	水斗式水轮机	45e	水力学	376c
水电站备用运行方式	345d	水丰水电站	349a	水力要素量测	377c
水电站财务分析	313d	水工混凝土	349e	水流挟沙能力	378b
水电站厂房	314d	水工建筑物	350f	水流阻力	378f
水电站厂内经济运行	316c	水工建筑物原型观测	351d	水轮泵	409f
水电站出力	318a	水工结构静力模型试验	352e	水轮发电机	380b
水电站带计划负荷运行		水工结构抗震试验	353a	水轮发电机安装	382d
方式	344a	水工结构模型试验	353c	水轮发电机半水内冷	393e
水电站的能量指标	599b	水工结构模型试验量测		水轮发电机充电容量	387e
水电站防火	318f	技术	354a	水轮发电机导轴承	383e
水电站工程规划	320c	水工结构模型试验相似		水轮发电机电晕	384a
水电站公用设备自动		理论	354e	水轮发电机定子	384c
控制	322b	水工结构破坏模型试验	355b	水轮发电机定子绕组	384e
水电站供水系统	323a	水工金属结构维修	355d	水轮发电机定子铁芯	384d
水电站过电压保护	323f	水工模型试验	356c	水轮发电机额定电压	386a
水电站机电设备运行		水化热	436e	水轮发电机额定功率	
管理	326c	水灰比	170f, 350d	因数	386c
水电站计算机辅助设计	326f	水击	357e	水轮发电机额定容量	385f
水电站计算机监控系统	327f	水击模型试验	358c	水轮发电机额定转速	395f
水电站接地系统	331b	水静力学	358e	水轮发电机飞逸转速	395f
水电站进水口	333f	水口水电站	359d	水轮发电机氟里昂内冷	385a
水电站经济分析	334e	水库	360d	水轮发电机负序电抗	387a
水电站经济评价	335f	水库变动回水区	362e	水轮发电机负载特性	381d
水电站年运行费	336d	水库初期蓄水	363a	水轮发电机机架	385c
水电站排水系统	336d	水库调度图	363f	水轮发电机基本电气	
水电站设计保证率	21c	水库工程地质勘察	365a	参数	385f
水电站设计水头	337b	水库回水	365f	水轮发电机基础	387e
水电站生产成本	337e	水库群补偿径流调节	366d	水轮发电机继电保护	388b
水电站水库优化调度	338a	水库水文泥沙观测	367f	水轮发电机进相容量	387d
水电站调频运行方式	345c	水库调节性能	193d	水轮发电机绝缘等级	390d
水电站通信	339c	水库调节周期	193d	水轮发电机空气冷却	391a
水电站投资	341d	水库下游河道冲刷	368c	水轮发电机空载特性	381d
水电站效益	342b	水库消落深度	337d	水轮发电机励磁	391c
水电站压缩空气系统	342f	水库蓄能	193d	水轮发电机临界转速	396a
水电站油系统	343d	水库淹没处理	368f	水轮发电机零序电抗	387b
水电站运行方式	344a	水库淹没实物指标	370a	水轮发电机全水内冷	393e
水电站造价	341d	水库诱发地震	371b	水轮发电机双水内冷	393e
水电站照度	345e	水库淤积	371e	水轮发电机水内冷	393e
水电站照明	346a	水力发电	372e	水轮发电机调相容量	387c
水电站自动电压控制	346d	水力发电厂	311f	水轮发电机调整特性	381d

水轮发电机停机混合 制动	403f
水轮发电机推力轴承	394a
水轮发电机 V 形特性	381d
水轮发电机外特性	381d
水轮发电机稳态短路 特性	381d
水轮发电机轴电流	395b
水轮发电机轴电压	395b
水轮发电机转动惯量	395c
水轮发电机转速	395e
水轮发电机转子	396b
水轮发电机转子磁轭	397a
水轮发电机转子磁极	397a
水轮发电机转子动平衡	397c
水轮发电机组	409f
水轮发电机组不对称 运行	398b
水轮发电机组带负荷 试验	398e
水轮发电机组动力特性	399d
水轮发电机组进相运行	400c
水轮发电机组空载试验	400e
水轮发电机组起动试 运行	401e
水轮发电机组调峰	402b
水轮发电机组调频	402e
水轮发电机组调相	402f
水轮发电机组停机电 制动	403d
水轮发电机组停机机械 制动	403c
水轮发电机组停机制动	403b
水轮发电机组效率试验	404a
水轮发电机组振动	407a
水轮发电机组轴线调整	408b
水轮发电机组自动控制	408f
水轮机	409f
水轮机安装	411f
水轮机安装高程	413e, 419f
水轮机层	414b
水轮机出力	414d
水轮机单位参数	414e

水轮机单位出力	415d
水轮机单位流量	415b
水轮机单位转速	414f
水轮机导轴承	415e
水轮机额定出力	414d
水轮机额定流量	418b
水轮机额定水头	422e
水轮机额定效率	426c
水轮机额定转速	416e
水轮机飞逸转速	416f
水轮机机械损失	425b
水轮机加权平均水头	422c
水轮机加权平均效率	426d
水轮机静平衡	417b
水轮机空载流量	418b
水轮机流量	418b
水轮机模型试验	418c
水轮机排出高度	419c
水轮机汽蚀和磨损	420b
水轮机容积损失	425b
水轮机设计水头	422c
水轮机水力损失	425b
水轮机水压脉动	421c
水轮机特征水头	422c
水轮机调速器	422f
水轮机吸出高度	423f
水轮机相似理论	424c
水轮机效率	425b
水轮机运转特性曲线	426d
水轮机主轴	427e
水轮机综合特性图	427f
水轮机最大出力	414d
水轮机最大流量	418b
水轮机最大水头	422c
水轮机最高效率	426b
水轮机最小出力	414e
水轮机最小水头	422c
水轮机最优效率出力	414d
水内冰	28d
水能计算	193b
水能经济	428e
水能利用学	429e
水能利用优化	430f

水能资源	433d
水泥	436b
水泥裹砂法	238d
水喷雾灭火	381b
水平运输	166a
水润滑橡胶导轴承	415f
水射流	436e
水头	437b
水土流失	437e
水位观测	438d
水位流量关系	438f
水文地质	440c
水文地质测绘	439c
水文地质试验	439e
水文调查	442a
水文计算	442d
水文勘测	443c
水文频率分析	443f
水文学	444d
水文预报	445e
水文站网	446c
水文资料	447a
水文自动测报系统	447c
水系	447f
水下爆破	448d
水下混凝土施工	449a
水下开挖	293b
水压致裂法	78a
水跃	449c
水跃消能塘	512f
水质	449f
水准测量	111d
水资源综合利用	450c
瞬态电阻	386e
斯肯普顿, A. W. (A. W. Skempton)	474c
死库容	361a, 451d
死水位	451d
松花江水电规划	452a
苏联水能资源	452f
素混凝土	162c
速凝剂	497e
塑料瓦	395a

塑性力学	453c	调压井	467c	土石料开采	489e
随机水文过程	454c	调压室	467e	土石料填筑	490c
碎屑岩	539a	调压室稳定断面	467f	土石料现场碾压试验	491a
隧洞衬砌	562c	调压塔	467e	土体	480d
隧洞开挖	454f	贴壁冷却	67d	土体加固	491b
隧洞泄流段	518f	通仓	163c	土体稳定性	492a
梭式矿车	571d	通信卫星	340d	土体液化	493b
		通用水泥	436b	土体应力应变分析	493e
		同步电抗	386d	土压力	494b
他励晶闸管整流器励磁		同步系统	469d	湍流	503f
系统	392c	司轴小电机起动	52a	推力头	395a
塔式进水口	457a	铜街子水电站	471b	推移质泥沙	494f
太沙基，K. (K.		投资回收期	313f	退水渠	520b
Terzaghi)	474a，	投资利润率	314a	托里切利，E. (E.	
	474f，482a，565a	投资利税率	314a	Torricelli)	377a
弹性力学	457d	图库鲁伊水电站	472b	托马，D. (D. Thoma) ..	467f
弹性模量	457f	土	480d	托普，L. C. (L. C.	
掏槽	455f	土坝	482d	Topp)	185b
桃花汛	145d	土的成因	480e	脱水段	495e
特纳，M. J. (M. J.		土的工程分类	473a		
Turner)	185b	土的固结与沉降	473e	外加剂	497a
梯段爆破	458d	土的力学性质	474e	外均衡母线接线	199d
梯级流量补偿径流调节	366f	土的压实	475f	外桥形接线	260a
梯级水电站	458f	土的原位测试	476d	万安水电站	498a
梯级水电站集中控制	461a	土动力学	477c	万家寨水利枢纽	498f
梯级水库洪水调节	148c	土方开挖	477e	网络图	289f
梯级衔接	459b	土工合成材料	478b	微波接力通信	340b
天荒坪抽水蓄能电站	461e	土工离心模型试验	479b	微波中继站	340b
天气现象	258a	土工模型试验	478f	韦利卡诺夫，M. A. (M.	
天然骨料	462e	土工取样	479d	A. Великанов)	378b
天然建筑材料勘察	462f	土工试验	480a，481a	围岩	455a
天生桥二级水电站	463d	土工原型观测	480a	围堰	500a
天生桥一级水电站	464c	土工织物	486c	帷幕	501a
填料	226c	土力学	480d	帷幕灌浆	501c
挑流鼻坎	469a	土牛	490b	尾水管	501f
挑流消能	520f	土壤侵蚀	437e	尾水渠	502c
调洪库容	116e，181e，361b	土石坝	482c	尾水隧洞	502d
调节保证	465e	土石坝材料现场试验	484b	尾水调压室	469a
调节库容	361a，451d	土石坝施工	485a	尾水位	502e
调节流量	193a	土石坝原型观测	487b	卫星通信	340c
调节式水电站	191c	土石方开挖机械	487f	渭源水电站	503a
调速器调节规律	466d	土石方压实机械	489a	文开河	28f
调压阀	466f	土石混合坝	482d		

紊流	503f	斜墙坝	482e	雅砻江水电规划	533a
紊流边界层	26c	斜线图	289f	雅鲁藏布江水系水能	
稳定性理论	131d	斜向谷坝址	17c	资源	533d
涡带	421d	泄洪隧洞	518d	雅西雷塔水电站	534a
涡流	504d	泄洪闸门	519a	亚洲水能资源	535a
蜗壳	504f	泄流段	5a, 520b	延时给励磁的自动	
卧式水轮发电机	505d	泄水建筑物	519f	自同步	470f
乌江渡水电站	506a	泄水建筑物维修	522a	岩爆	535f
乌江水电规划	507a	泄水建筑物原型观测	523a	岩基处理	536b
乌斯特-伊里姆水电站	507d	泄水闸	523e	岩浆岩	538e
无梁岔管	34d	谢才, A. (A. Chezy)	242d	岩溶	537f
无压进水口	334a	心墙坝	482e	岩塞爆破	537f
无压泄洪隧洞	518e	新安江水电站	524c	岩石	538d
无压引水道式引水系统	562f	新奥地利隧洞施工法	525b	岩石坝基处理	540c
无压引水隧洞	562a	新丰江水电站	526a	岩石边坡	540c
五强溪水电站	508a	新高瀨川抽水蓄能电站	527a	岩石地基	541a
武开河	28c	信号系统	527e	岩石工程数值分析	541d
		兴利库容	361a, 451d	岩石力学	542b
		行政管理通信	340f	岩石力学性质	543f
		徐变	229a	岩滩水电站	545a
		蓄电池室	108b	岩体	542b
		蓄电池组浮充电运行		岩体变形试验	547d
		方式	212d	岩体风化	546a
		蓄电池组直流电源	211d	岩体结构	546d
		悬臂模板	244d	岩体力学性质试验	547b
		悬臂式重力坝	588d	岩体力学性质现场试验	547b
		悬挂式帷幕	501c	岩体模型试验	547f
		悬式水轮发电机	529a	岩体强度试验	547c
		悬移质泥沙	529a	岩体软弱结构面	548c
		旋转备用	24b	岩体渗透试验	547e
		旋转断层	94b	岩体位移监测	548f
		雪线	27e	岩体稳定性	548f
		汛期限制水位	529d	岩体原位观测	549c
				岩土体蠕动	550a
		压力钢管	187d	盐锅峡水电站	550d
		压力管道	530a	堰流	551b
		压力前池	530e	羊卓雍湖抽水蓄能电站	551f
		压力上升率	531c	杨氏 (T. Young) 模量	157f
		压污耙式清污机	261e	腰荷	341b
		鸭绿江水电规划	531f	窑洞式厂房	75c
		鸭绿江水系中国部分		遥测	568c
		水能资源	532d	遥感	552f
				遥控	568f

周不平衡系数	344c	专门性工程地质图	122b	纵横制自动电话交换机	341b
周调节	193e, 344d	专项迁建	596c	纵联差动保护	388d
周调节系数	344e	转轮	597a	纵向谷坝址	17d
轴绝缘	384a	转轮公称直径	598b	纵向围堰	500b
轴流式水轮机	589d	转速上升率	598e	走向	36a
珠江水系水能资源	590c	转子回路一点接地保护	390a	阻抗式调压室	468c
主坝	7c	装机容量	599a	钻爆法	601f
主变压器布置	591b	装机容量年利用小时数	599d	钻孔	455a
主变压器继电保护	178a	准同步	469d	钻孔爆破	601b
主变压器升压及冲击合闸		资金的时间价值	335a	钻孔机械	601e
试验	398e	自复励整流器励磁系统	392e	最大干密度 ρ_d	476a
主厂房	592d	自励晶闸管整流器励磁		最小抵抗线	92f
主厂房机电设备布置	594b	系统	392d	最优含水量 w_{op}	476a
主厂房起吊设备	595b	自升模板	244e	坐标制光字信号装置	528c
主动土压力	494b	自同步	470d	座环	602e
主机间	314d	综合利用工程费用分摊	599f		
主体工程施工期	290c	综合利用水库径流调节	600e		
主要建筑物	351a	综合性工程地质图	122b	CAD 应用软件	327a
主闸门	125d	总库容	181e, 361d	CAD 支撑软件	327a
柱状法	163b	纵缝	163b	Z 替代法	432d

周不平衡系数	344c	专门性工程地质图	122b	纵横制自动电话交换机	341b
周调节	193e, 344d	专项迁建	596c	纵联差动保护	388d
周调节系数	344e	转轮	597a	纵向谷坝址	17d
轴绝缘	384a	转轮公称直径	598b	纵向围堰	500b
轴流式水轮机	589d	转速上升率	598e	走向	36a
珠江水系水能资源	590c	转子回路一点接地保护	390a	阻抗式调压室	468c
主坝	7c	装机容量	599a	钻爆法	601f
主变压器布置	591b	装机容量年利用小时数	599d	钻孔	455a
主变压器继电保护	178a	准同步	469d	钻孔爆破	601b
主变压器升压及冲击合闸		资金的时间价值	335a	钻孔机械	601e
试验	398e	自复励整流器励磁系统	392e	最大干密度 ρ_d	476a
主厂房	592d	自励晶闸管整流器励磁		最小抵抗线	92f
主厂房机电设备布置	594b	系统	392d	最优含水量 w_{op}	476a
主厂房起吊设备	595b	自升模板	244e	坐标制光字信号装置	528c
主动土压力	494b	自同步	470d	座环	602e
主机间	314d	综合利用工程费用分摊	599f		
主体工程施工期	290c	综合利用水库径流调节	600e		
主要建筑物	351a	综合性工程地质图	122b	CAD 应用软件	327a
主闸门	125d	总库容	181e, 361d	CAD 支撑软件	327a
柱状法	163b	纵缝	163b	Z 替代法	432d